نشریه علمی-پژوهشی
شیمی و مهندسی شیمی ایران
https://nsmsi.ir
NSMSI ۱۳۶۰
نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران | دوره ۴۴، شماره ۴، ۱۴۰۴ | ISSN: 1022-7768

مروری بر نانوحباب‌ها و کاربردهای نوین آن‌ها: بهبود عملکرد و افزایش بهره‌وری

مجید میرزایی *[+1]، علیمراد رشیدی[2]

۱ گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

۲ گروه فناوری نانو و کربن، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

چکیده

نانوحباب‌ها به‌عنوان یکی از ساختارهای نوین در سامانه‌های کلوئیدی، به‌دلیل پایداری بالا، سطح ویژه گسترده و رفتار فیزیکوشیمیایی منحصربه‌فرد، در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای را در حوزه‌های صنعتی و تحقیقاتی به خود جلب کرده‌اند. این ساختارهای گازی نانومقیاس که در دو نوع سطحی و حجمی تولید می‌شوند، با بهره‌گیری از روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و فیزیکوشیمیایی قابل سنتز هستند. در این مقاله، ضمن مرور روش‌های ساخت نانوحباب‌ها، به‌ویژه به کاربردهای نوین آن‌ها در صنعت نیروگاهی و نقش آن‌ها در مهار خوردگی فلزات پرداخته می‌شود. خوردگی یکی از چالش‌های اساسی در واحدهای نیروگاهی، به‌ویژه در محیط‌های اسیدی مانند سامانه‌های زمین گرمایی، محسوب می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تزریق نانوحباب‌های هوایی به محیط‌های خورنده می‌تواند نرخ خوردگی فولاد را تا ۵۰ درصد کاهش دهد. این عملکرد حفاظتی از طریق تشکیل یک لایه نانویی حباب‌مانند روی سطح فلز و تسریع تجمع ترکیباتی نظیر سیلیکا در محیط اسیدی حاصل می‌شود. افزون‌براین، نانوحباب‌ها در کاربردهای دیگری مانند تمیزکاری سطوح، کاهش اصطکاک در سیالات، حذف آلاینده‌ها و بهبود فرایند شناورسازی مواد معدنی نیز قابلیت‌های منحصربه‌فردی از خود نشان داده‌اند. نتایج بررسی‌ها، افق‌های نوینی را در بهره‌گیری از نانوحباب‌ها برای افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش دوام زیرساخت‌های فلزی در نیروگاه‌ها نوید می‌دهد.

اطلاعات مقاله

CC BY

واژه‌های کلیدی:

نانوحباب‌های سطحی،
نانوحباب‌های حجمی،
خوردگی فلزات، زمین گرمایی،
بهبود بهره‌وری.

Keywords:

Bulk nanobubbles,
Surface nanobubble,
Metal corrosion,
Geothermal,
Efficiency improvement.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۴

نوع مقاله: مروری

مقدمه

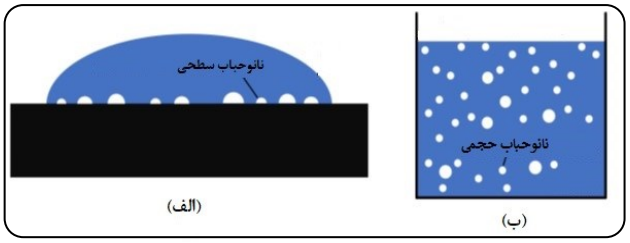
حباب‌ها از جمله پدیده‌های رایج در طبیعت و زندگی روزمره هستند که به‌صورت ساختارهای کروی یا نیم‌کره‌ای در سطح مایعات یا درون آن‌ها ظاهر می‌شوند. آن‌ها نتیجه پراکندگی گاز در محیط مایع هستند و در بسیاری از فعالیت‌های انسانی، از جمله شست‌وشو، جوشیدن،

* عهده‌دار مکاتبات
+E- mail: mjmirzaei@nri.ac.ir

ارجاع: مجید میرزایی، علیمراد رشیدی، مروری بر نانوحباب‌ها و کاربردهای نوین آن‌ها: بهبود عملکرد و افزایش بهره‌وری، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، **۴۴(۴)**: ۱ تا ۲۹ (۱۴۰۴).

فرآیندهای صنعتی و حتی فرآیندهای زیستی دیده می‌شوند [۱]. با این حال، نوعی از حباب‌ها با ویژگی‌هایی کاملاً متفاوت از حباب‌های مرئی و ناپایدار معمول، در دهه‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند که نانوحباب نام گرفته‌اند. این ساختارهای گازی نانومتری به‌دلیل پایداری بالا، رفتار منحصربه‌فرد فیزیکوشیمیایی، سطح تماس ویژه زیاد و امکان مهندسی سطحی، به‌عنوان یکی از نوآورانه‌ترین پدیده‌ها در علم و فناوری نانو شناخته می‌شوند[۲]. نانوحباب‌ها به‌طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: نانوحباب‌های حجمی (Bulk Nanobubbles) که درون حجم مایع پراکنده‌اند و معمولاً قطری کمتر از ۱۰۰۰ نانومتر دارند؛ و نانوحباب‌های سطحی (Surface Nanobubbles) که در فصل مشترک جامد–مایع تشکیل می‌شوند و ابعادی در حدود ده‌ها تا صدها نانومتر دارند[۳] (شکل ۱). برخلاف انتظار نظری که پایداری این ساختارها را فقط در حد چند میلی‌ثانیه پیش‌بینی می‌کرد، مطالعات تجربی نشان داده‌اند که نانوحباب‌ها می‌توانند از چند ساعت تا چند ماه در محیط مایع دوام بیاورند، حتی در دماهایی نزدیک به نقطه جوش آب. این پایداری چشمگیر را می‌توان به فاکتورهایی چون فشار داخلی بالا، بار سطحی، کشش سطحی خاص و کاهش نرخ نفوذ گاز نسبت داد. این ویژگی‌های منحصر به فرد سبب شده که نانوحباب‌ها در کاربردهای متعددی مطرح شوند. در حوزه پزشکی، به عنوان عوامل کنتراست در تصویربرداری فراصوت و حامل‌های دارویی هوشمند، امکان رهایی دقیق و رساندن دارو به نقاط هدفمند را فراهم می‌کنند. در کشاورزی، نانوحباب‌ها جذب آب و مواد مغذی توسط ریشه گیاهان را افزایش می‌دهند و در نتیجه به بهبود رشد و عملکرد محصولات زراعی کمک می‌کنند. در صنعت، از آن‌ها در فرایندهای تصفیه آب و فاضلاب، تمیزکاری سطحی، افزایش راندمان واکنش‌های شیمیایی و شناورسازی مواد معدنی استفاده می‌شود [۴–۶].

اما یکی از جذاب‌ترین و نوظهورترین حوزه‌های کاربرد نانوحباب‌ها، استفاده از آن‌ها در مهار خوردگی فلزات است، به‌ویژه در زیرساخت‌های نیروگاهی که در معرض محیط‌های اسیدی و دمای بالا قرار دارند[۷]. در صنایع نیروگاهی، روش‌های متداول برای کاهش خوردگی فلزات شامل استفاده از پوشش‌های محافظتی، مهارکننده‌های شیمیایی، تغییر pH محیط و آلیاژسازی فلزات است. این روش‌ها هرچند در بسیاری از موارد اثربخش هستند، اما محدودیت‌هایی دارند. پوشش‌های شیمیایی اغلب هزینه بالایی دارند و در شرایط دما و فشار بالا ناپایدار می‌شوند. مهارکننده‌های شیمیایی ممکن است اثر کوتاه‌مدت داشته باشند و برخی از آن‌ها مشکلات زیست‌محیطی ایجاد کنند. تغییر pH یا استفاده از آلیاژهای مقاوم، نیازمند سرمایه‌گذاری و کنترل فرآیندهای پیچیده است و همیشه بازده کامل ندارد. در این میان، نانوحباب‌ها به‌دلیل پایداری بالا، توانایی ایجاد لایه محافظ بر سطح فلز و قابلیت ترکیب با فرآیندهای موجود،



شکل ۱ – نانو حباب‌های سطحی و حجمی: (الف) نانو حباب‌های سطحی، (ب) نانو حباب‌های حجمی [۳]

به عنوان یک فناوری مکمل یا جایگزین مطرح شده‌اند. مطالعات نشان داده‌اند که تزریق نانوحباب‌ها در محیط‌های خورنده می‌تواند نرخ خوردگی را به طور قابل توجهی کاهش دهد و در عین حال اثرات جانبی زیست‌محیطی محدودی دارد. علاوه بر این، قابلیت کنترل اندازه، تراکم و نوع گاز نانوحباب‌ها امکان بهینه‌سازی عملکرد آن‌ها را بسته به نوع فلز و شرایط عملیاتی فراهم می‌کند. بنابراین، نانوحباب‌ها نه تنها یک فناوری نوظهور برای مهار خوردگی محسوب می‌شوند، بلکه با مزایای خاص خود، پتانسیل ترکیب با روش‌های سنتی و ارتقاء عملکرد سیستم‌های صنعتی را دارند در واحدهای زمین گرمایی، خوردگی فلزات یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش بهره‌وری و خرابی تجهیزات است. آب‌های زمین گرمایی اغلب حاوی ترکیباتی خورنده همچون یون‌های کلرید، سولفات و سیلیکا هستند و دمای بالا نیز موجب تسریع واکنش‌های الکتروشیمیایی می‌شود. در چنین شرایطی، استفاده از پوشش‌ها یا مهارکننده‌های شیمیایی متداول با محدودیت‌های زیادی از جمله هزینه بالا، عدم پایداری، سمیت محیطی و دشواری در اعمال مواجه است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که تزریق مداوم نانوحباب‌های هوایی به محیط‌های زمین گرمایی اسیدی می‌تواند نرخ خوردگی فولاد را تا ۵۰ درصد کاهش دهد [۸, ۹]. این پدیده به‌واسطه‌ی تشکیل یک لایه نانویی متشکل از حباب‌های متراکم روی سطح فلز رخ می‌دهد که مانند یک سد فیزیکی مانع تماس مستقیم یون‌های خورنده با سطح فلز می‌شود. همچنین، این نانوحباب‌ها باعث افزایش نرخ تجمع سیلیکا محلول بر سطح فلز و در نتیجه، تقویت لایه‌های محافظتی طبیعی می‌گردند. چنین مکانیسم‌هایی که در مقیاس نانومتری عمل می‌کنند، نه‌تنها به کاهش نرخ خوردگی کمک می‌کنند بلکه جایگزینی پایدار و دوستدار محیط‌زیست برای مواد بازدارنده سنتی محسوب می‌شوند. با در نظر گرفتن پتانسیل قابل توجه نانوحباب‌ها در کاهش خوردگی، بهینه‌سازی شرایط تولید آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های مختلفی برای تولید نانوحباب‌ها گزارش شده است که از جمله می‌توان به تحریک هیدرودینامیکی، استفاده از میدان‌های اولتراسونیک، فرآیندهای الکتروشیمیایی و روش‌های تزریق گاز تحت فشار اشاره کرد. هر یک از این روش‌ها ویژگی‌های خاصی در کنترل اندازه، پایداری، تراکم و یکنواختی نانوحباب‌ها دارند که بسته به کاربرد مورد نظر باید به‌دقت انتخاب شوند[۱۰].

در این مقاله، تلاش می‌شود تا با تمرکز بر روش‌های ساخت نانوحباب‌ها، تبیین مکانیسم‌های عملکرد آن‌ها در مهار خوردگی و بررسی کاربردهای ویژه در زیرساخت‌های نیروگاهی، نگاهی جامع و تحلیلی به این فناوری نوین ارائه شود. امید است نتایج این پژوهش بتواند افق‌های جدیدی برای استفاده صنعتی و عملی از نانوحباب‌ها در مدیریت خوردگی و ارتقاء بهره‌وری تجهیزات نیروگاهی فراهم آورد.

ترکیب و پایداری نانوحباب‌ها: عناصر تشکیل‌دهنده و عوامل مؤثر

نانوحباب‌ها به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان، از جمله پایداری طولانی‌مدت و قابلیت عملکرد در مقیاس نانومتری، مورد توجه بسیاری از محققان در حوزه‌های علمی و صنعتی قرار گرفته‌اند. در این بخش به بررسی ترکیب و پایداری دو نوع اصلی نانوحباب، یعنی نانوحباب‌های غشایی و نانوحباب‌های غیرغشایی پرداخته می‌شود.

ترکیب نانوحباب‌های غشایی

نانوحباب‌های غشایی ساختاری پیچیده‌تری نسبت به نانوحباب‌های غیرغشایی دارند و از سه عنصر اصلی تشکیل شده‌اند[۱۱]:

– هسته گازی: این بخش مرکزی نانوحباب از گاز تشکیل شده است.

– لایه پوسته‌ای: این لایه که اغلب از مواد فعال سطحی، پلیمرها یا لیپیدها ساخته می‌شود، نقش حفاظتی مهمی را ایفا می‌کند.

– فاز مایع: این محیط اطراف نانوحباب را دربر می‌گیرد و معمولاً از آب، محلول‌های نمکی یا حلال‌های آلی تشکیل شده است.

همان‌طور که در شکل ۲ الف نشان داده شده است، لایه پوسته‌ای نقش کلیدی در پایداری این نوع نانوحباب‌ها ایفا می‌کند. این لایه با تشکیل یک پوشش متراکم از مولکول‌ها، از انتشار گاز در محیط جلوگیری کرده و عمر نانوحباب را افزایش می‌دهد[۱۲].

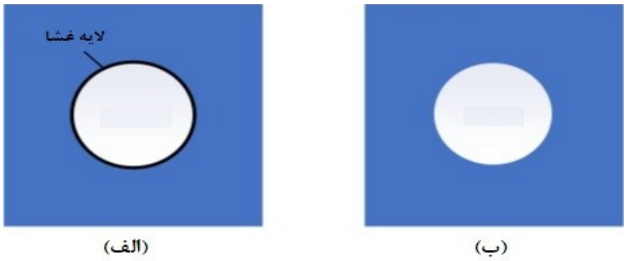
ترکیب نانوحباب‌های غیرغشایی

برخلاف نانوحباب‌های غشایی، نانوحباب‌های غیرغشایی تنها از دو عنصر اصلی تشکیل شده‌اند[۱۲]:

– هسته گازی

– فاز مایع

این ساختار ساده‌تر در شکل ۲ ب نشان داده شده است. بر اساس نظریه کلاسیک اِپشتین–پلِست[۱]، حباب‌هایی که فاقد غشا هستند، باید عمر کوتاهی داشته باشند، زیرا انتشار گاز از داخل آن‌ها باید به سرعت اتفاق بیفتد. با این حال، مشاهدات تجربی نشان داده‌اند که این نوع نانوحباب‌ها نیز قادر به دوام در محیط مایع هستند و این موضوع یکی از مباحث مورد بحث در تحقیقات اخیر در این حوزه محسوب می‌شود [۱۳].



شکل ۲ – نمودار ساختار نانو حباب‌ها: (الف) نانو حباب‌های غشایی، (ب) نانو حباب‌های غیرغشایی [۱۲]

عوامل مؤثر بر پایداری نانوحباب‌ها

پایداری نانوحباب‌ها به معنای توانایی آن‌ها در مقاومت در برابر فروپاشی و حفظ ساختارشان در طول زمان است. عوامل مختلفی بر این پایداری تأثیر می‌گذارند [۱۴]:

– بار سطحی: وجود بار الکتریکی روی سطح نانوحباب‌ها (معمولاً به صورت پتانسیل زتا) یکی از عوامل اصلی در پایداری آن‌هاست. هرچه مقدار پتانسیل زتا بالاتر باشد، نانوحباب پایدارتر است.

– کشش سطحی: کاهش کشش سطحی می‌تواند به بهتر شدن پایداری نانوحباب کمک کند.

– خواص محلول: نوع حلال، pH، دما و غلظت املاح موجود در محیط نیز می‌توانند بر پایداری نانوحباب‌ها تأثیر بگذارند.

با این حال، با گذشت زمان، مقدار پتانسیل زتا کاهش می‌یابد. این کاهش به همراه حرکت براونی مولکول‌ها باعث می‌شود تا نانوحباب‌ها با یکدیگر ادغام شوند و حباب‌های بزرگ‌تری تشکیل دهند. این پدیده می‌تواند باعث افزایش اندازه نانوحباب‌ها به جای کاهش آن شود [۱۵].

کشش سطحی و نقش آن در پایداری نانوحباب‌ها

کشش سطحی یکی از مهم‌ترین عوامل فیزیکوشیمیایی مؤثر بر تشکیل، پایداری و رفتار نانوحباب‌ها است. نانوحباب‌ها، به‌ویژه آن‌هایی که در سطح مایع یا در حجم آن تشکیل می‌شوند، به‌دلیل نسبت بالای سطح به حجم و انرژی سطحی ویژه، تحت تأثیر مستقیم کشش سطحی قرار دارند. کشش سطحی بالا موجب افزایش انرژی سیستم می‌شود، که در حالت سنتی انتظار می‌رود منجر به ترکیدن سریع حباب‌ها گردد؛ با این حال، نانوحباب‌ها برخلاف حباب‌های مرئی و ماکروسکوپی، پایداری بالایی از چند ساعت تا چند ماه نشان می‌دهند. این پایداری غیرمنتظره عمدتاً ناشی از وجود شارژ سطحی، لایه‌های جذب‌شده یون‌ها یا سورفکتانت‌ها و کشش سطحی اصلاح‌شده در اطراف حباب‌ها است [۱۶].

یکی از مکانیسم‌های اصلی که با کشش سطحی مرتبط است، توزیع فشار داخلی در نانوحباب‌هاست. به دلیل شعاع کوچک نانوحباب‌ها

(۱) Epstein–Plesset theory

جدول ۱ - مزایا و معایب روش‌های تهیه نانو حباب‌های حجمی.

روش‌ها	مزایا	معایب
روش همزنی مکانیکی	این روش به دلیل سادگی و آسانی اجرای آن، به عنوان یک روش محبوب برای تهیه نانوحباب‌ها شناخته شده است.	توانایی تولید محدود؛ اندازه حباب‌ها یکنواخت نیست؛ تعداد کمی از نانوحباب‌ها تولید می‌شود.
روش غشا نانومنفذی	این روش امکان کنترل دقیق بر روی اندازه و توزیع نانوحباب‌ها را فراهم می‌کند.	نیاز به غشاهای ویژه با اندازه‌های منفذ دقیق وجود دارد، که ممکن است با گذشت زمان به دلیل آلودگی یا بسته شدن منافذ، کارایی آن کاهش یابد
روش میکروفلوئیدیک	این روش به دلیل قابلیت کنترل دقیق بر روی اندازه و توزیع نانوحباب‌ها، به همراه ارائه میزان بالای خودکاری و ادغام با فرآیندهای دیگر، از جمله روش‌های پیشرفته‌تر برای تولید نانوحباب‌ها شناخته شده است.	نیاز به تجهیزات میکروفلوئیدی پیچیده و تکنیک‌های ساخت پیشرفته می‌باشد
روش کاویتاسیون صوتی	این روش به دلیل استفاده از امواج فراصوت، قادر به تولید مؤثر و سریع نانوحباب‌ها است	نیاز به تجهیزات ویژه و منابع فراصوت دارد، و کنترل دقیق بر روی اندازه و توزیع حباب ممکن است محدود باشد.
روش کاویتاسیون هیدرودینامیکی	این روش به دلیل کارایی انرژی بالا، هزینه پایین و مقیاس‌پذیری، از جمله روش‌های موثر برای تولید نانوحباب‌ها است.	کارایی آن ممکن است تحت تأثیر عواملی مانند نرخ جریان و فشار قرار گیرد.
روش آزادسازی گاز حل شده	این روش به دلیل آسانی و سادگی اجرای آن، به همراه هزینه پایین، از جمله روش‌های محبوب برای تهیه نانوحباب‌ها است.	کنترل محدود بر روی اندازه و توزیع حباب؛ احتمال تشکیل حباب‌های بزرگ‌تر؛ زمان‌بر بودن فرآیند
روش تغییر فشار دوره‌ای	این روش به دلیل آسانی و سادگی اجرای آن، به همراه هزینه پایین، از جمله روش‌های محبوب برای تهیه نانوحباب‌ها است.	کنترل محدود بر روی اندازه و توزیع حباب وجود دارد، و ممکن است حباب‌های بزرگ‌تر نسبت به روش‌های دیگر تشکیل شود
روش فشرده‌سازی هیدرولیک هوایی	این روش به دلیل قابلیت تولید نانوحباب‌ها به صورت بزرگ‌مقیاس و با هزینه پایین و کارایی بالا، از جمله روش‌های موثر برای تولید نانوحباب‌ها است.	کنترل دقیق بر روی اندازه و توزیع حباب ممکن است محدود باشد

(معمولاً کمتر از ۲۰۰ نانومتر)، فشار داخلی درون حباب بر اساس معادله لاپلاس بسیار بالاتر از فشار محیط است. این فشار داخلی باعث ایجاد تعادل نیروهای سطحی و دفع گاز از سطح می‌شود، اما در عین حال، بار سطحی و سورفکتانت‌ها می‌توانند کشش سطحی را کاهش داده و انتقال گاز را کند کنند، که در نتیجه، پایداری نانوحباب افزایش می‌یابد [۱۷].

مطالعات تجربی نشان داده‌اند که استفاده از سورفکتانت‌ها و تغییر pH محلول می‌تواند کشش سطحی را تنظیم کند و بنابراین اندازه و عمر نانوحباب‌ها را به‌طور مؤثر کنترل نماید. در نانوحباب‌های سطحی، کشش سطحی بر شکل و زاویه تماسی حباب با سطح جامد نیز تأثیرگذار است، به‌گونه‌ای که حباب‌های کوچک با زاویه تماس کمتر می‌توانند روی سطح ثابت بمانند و از ادغام یا ترکیدن سریع جلوگیری کنند [۷].

علاوه بر این، کشش سطحی پایین‌تر می‌تواند نرخ تجمع یون‌ها یا رسوبات معدنی در سطح نانوحباب‌ها را تغییر دهد که این موضوع مستقیماً بر کاربردهای صنعتی، از جمله مهار خوردگی فلزات در محیط‌های اسیدی و آب‌های خنک‌کننده، تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال، کاهش کشش سطحی موجب می‌شود که نانوحباب‌ها به‌صورت یکنواخت‌تر سطح فلز را پوشش دهند و لایه حفاظتی متراکم‌تری ایجاد کنند، که در نهایت باعث کاهش تماس مستقیم یون‌های خورنده با سطح فلز و بهبود عملکرد مهار خوردگی می‌شود [۱۸].

با توجه به اهمیت کشش سطحی، بهینه‌سازی شرایط فیزیکوشیمیایی محلول (مانند دما، pH، حضور سورفکتانت‌ها) و طراحی نانوحباب‌ها بر اساس کنترل کشش سطحی، نقش کلیدی در افزایش بازده و پایداری نانوحباب‌ها ایفا می‌کند. در نتیجه، مطالعه دقیق کشش سطحی و اثرات آن بر نانوحباب‌ها، نه تنها به درک بهتر رفتار این سیستم‌ها کمک می‌کند، بلکه راهکارهای عملی و صنعتی برای بهره‌برداری مؤثر از نانوحباب‌ها فراهم می‌آورد.

روش‌های تهیه نانوحباب‌های حجمی (BNBs)

نانوحباب‌های حجمی (BNBs) می‌توانند در یک مایع از طریق تنظیم فشار گاز، شدت فراصوت یا شدت همزنی تشکیل شوند. روش‌های متداول تهیه BNBs شامل همزنی مکانیکی، آزادسازی گاز حل شده، تغییر فشار و کاویتاسیون است. علاوه بر این، روش‌های میکروفلوئیدیک و غشای نانومتخلخل نیز می‌توانند برای تولید BNBs استفاده شوند. این قسمت به معرفی روش‌های تهیه نانوحباب‌های حجمی می‌پردازد و در پایان با جمع‌بندی مزایا و معایب هر یک از این روش‌ها، آن‌ها را در قالب جدول ۱ ارائه می‌دهد.

هر یک از روش‌های تهیه نانوحباب‌ها دارای مزایا و معایب خاصی است. انتخاب روش مناسب به شرایط عملیاتی، نوع کاربرد و دسترسی به تجهیزات وابسته بستگی دارد. برای مثال، اگر نیاز به کنترل دقیق

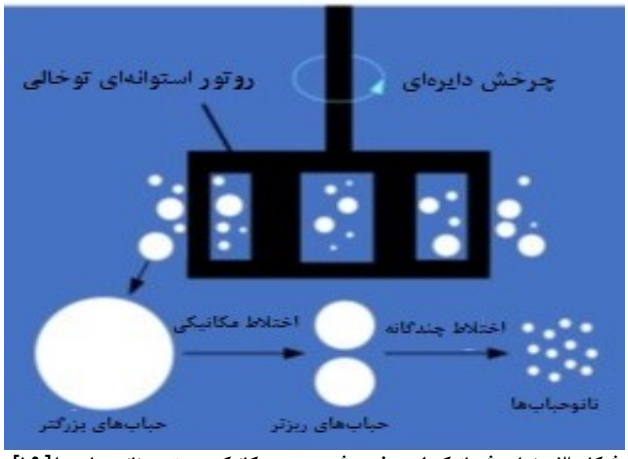
اندازه و توزیع حباب وجود داشته باشد، روش‌هایی مانند غشا نانومتخلخل یا میکروفلوئیدیک مناسب‌تر هستند. اما اگر روش ساده و ارزان انتخاب شود، روش‌هایی مانند آزادسازی گاز حل شده یا فشرده‌سازی هیدرولیک هوایی می‌توانند انتخاب مناسبی باشند.

روش همزنی مکانیکی در تولید نانوحباب‌های حجمی

روش همزنی مکانیکی یکی از روش‌های متداول برای تولید نانوحباب‌های حجمی (BNBs) است که بر اساس ایجاد تعامل بین فازهای گاز و مایع از طریق تحرک مکانیکی عمل می‌کند. در این روش، فاز مایع حاوی مواد فعال سطحی تحت همزنی شدید قرار گرفته و در نتیجه، تنش‌های برشی بالا، آشفتگی شدید، اثرات برخوردی و کاویتاسیون هیدرودینامیکی ایجاد می‌شوند (شکل ۳). این فرآیندها منجر به تشکیل حباب‌هایی می‌گردند که در طی چندین مرحله همزنی به طور مداوم کوچک‌تر شده و در نهایت به نانوحباب‌های حجمی تبدیل می‌شوند [۱۹]. در سالیان اخیر، محققان متعددی به بررسی این روش پرداخته‌اند. از جمله، *اچپار*[۱] و *همکاران* [۲۰] با استفاده از دستگاهی متشکل از یک پمپ و ستون دایره‌ای، نانوحباب‌ها را تحت شرایط مختلف فشار و کشش سطحی هوا–مایع تولید کردند. نتایج آزمایش‌های ایشان نشان داد که این روش می‌تواند به سرعت نانوحباب‌هایی با پایداری بیش از ۶۰ روز تولید کند. همچنین، سنتیل *کومار*[۲] و *همکاران* [۱۹] از این روش برای تولید نانوحباب‌ها در یک محیط غیرآبی (روغن به عنوان عامل انتقال حرارت) استفاده کردند. نتایج نشان داد که نانوحباب‌های تشکیل شده دارای قطری کمتر از ۲۰۰ نانومتر بودند و وجود آن‌ها باعث بهبود خواص حرارتی و رئولوژیکی روغن شد. در مطالعه‌ای دیگر، *جدهاو*[۳] و *همکاران* [۲۱]، تأثیر پارامترهای عملیاتی مانند شکل، سرعت چرخش، زمان و دما بر تشکیل نانوحباب‌ها در آب خالص را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در حالی که چگالی حباب‌ها به شدت تحت تأثیر شکل توخالی قرار می‌گیرد، توزیع اندازه، قطر متوسط و پتانسیل زتا تقریباً ثابت باقی می‌مانند. همچنین مشخص شد که افزایش سرعت چرخش، افزایش زمان عملیات و افزایش دما باعث افزایش غلظت نانوحباب‌ها می‌شود، زیرا این شرایط به آزادسازی هوای بیشتری از محیط مایع کمک می‌کنند.

متغیرهای اصلی که بر تولید و ویژگی نانوحباب‌های حجمی با این روش اثر می‌گذارند به شرح زیر است:

– سرعت همزن / دور موتور: بر اندازه و تراکم نانوحباب‌ها اثرگذار است.
– زمان اختلاط: طول مدت همزنی بر تعداد حباب‌ها و پایداری آن‌ها مؤثر است.
– دمای محلول و ویسکوزیته: بر نرخ هسته‌زایی و پایداری حباب‌ها تأثیر دارد.



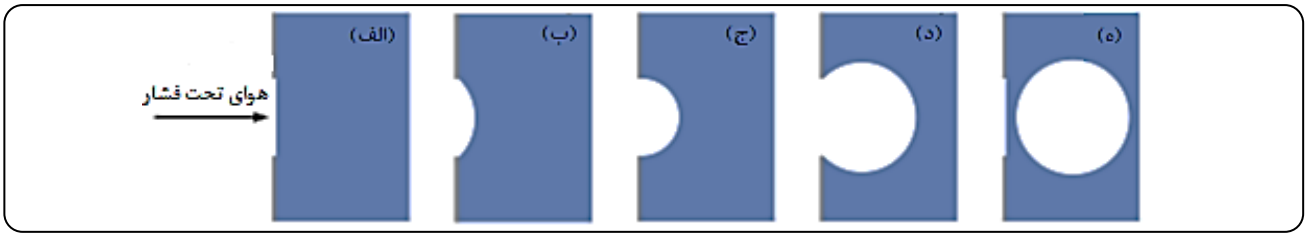
شکل ۳ – نمای شماتیک از هدف روش همزن مکانیکی در تهیه نانو حباب‌ها [۱۹]

روش غشا نانومتخلخل در تولید نانوحباب‌های حجمی

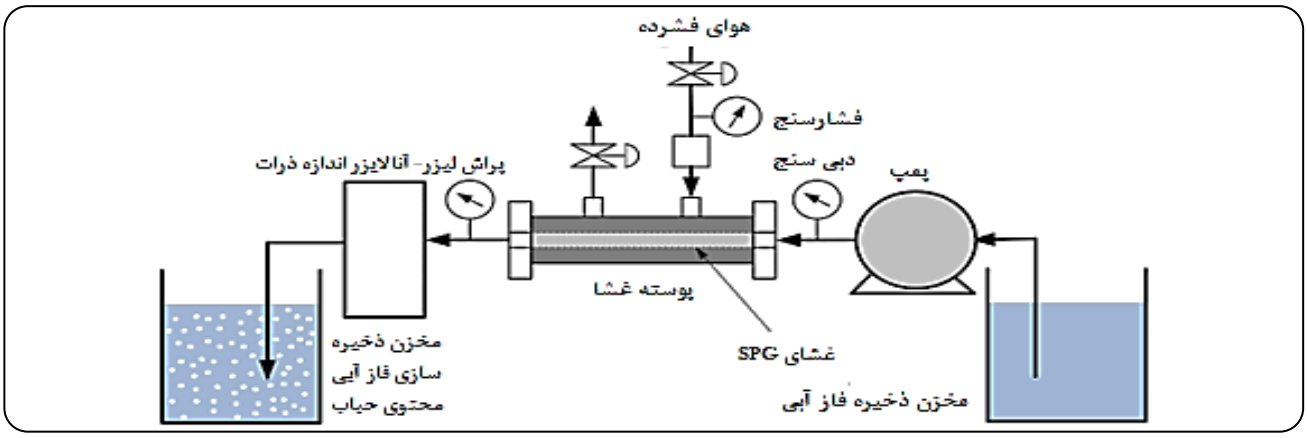
روش غشا نانومتخلخل یکی از روش‌های دقیق و کنترل‌پذیر برای تولید نانوحباب‌های حجمی (BNBs) است که در آن گاز تحت فشار به منافذ نانومتری غشا وارد می‌شود. این روش به دلیل قابلیت کنترل دقیق اندازه حباب‌ها و توزیع آن‌ها، از جمله روش‌های پیشرفته برای تولید نانوحباب‌ها شناخته شده است. در این روش، گاز به منافذ غشا تحت شرایط مشخص وارد می‌شود و در نتیجه، نانوحباب‌هایی با اندازه‌های کنترل‌شده تشکیل می‌شوند (شکل ۴)[۲۲].

در ابتدا، گاز به فاز مایع وارد می‌شود و در منافذ غشا به وجود می‌آید. اندازه نانوحباب‌ها در ابتدا برابر قطر منافذ غشا است، اما با گسترش حباب‌ها، قطر آن‌ها به تدریج افزایش می‌یابد. همچنین، نیروی جریان مایع بر روی حباب‌ها اثر می‌گذارد و با ادامه فرآیند، حباب‌ها از منافذ جدا می‌شوند و نانوحباب‌هایی با قطر بزرگ‌تر از قطر منافذ بدست می‌آیند. این روش نشان می‌دهد که با کاهش سرعت جریان مایع، اندازه نانوحباب‌های نهایی کوچک‌تر خواهد بود. غشاهای شیراسویی شیشه‌ای (SPG) نوعی غشا نانومتخلخل هستند که در سال ۱۹۸۱ توسط شرکت SPG در ژاپن توسعه داده شدند (شکل ۵). این غشاهای دارای منافذ یکنواخت و قابل تنظیم هستند و به عنوان یک ابزار مؤثر برای تولید نانوحباب‌ها به کار می‌روند. *کاکیزاکی* [۴] و *همکاران* [۲۳] از غشاهای SPG برای تهیه نانوحباب‌ها استفاده کردند. در این آزمایش، هوای فشرده شده به محلول سولفات دودسیل سدیم با غلظت ۰/۰۵ تا ۰/۵ ٪ وزنی وارد شد و سپس به غشا SPG منتقل شد. نتایج نشان داد که در شرایط مشخص، نانوحباب‌های یکنواخت با قطرهای متوسط ۳۶۰ تا ۷۲۰ نانومتر به صورت پایدار تولید شدند. قطر متوسط نانوحباب‌ها ۸/۶ برابر قطر منافذ بود و ابعاد آن‌ها تحت تأثیر سرعت هوای وارد شده و کشش سطحی مایع تغییر قابل توجهی نکرد. این نشان می‌دهد که اندازه نانوحباب‌ها می‌تواند

(۱) Etchepare
(۲) Senthilkumar
(۳) Jadhav
(۴) Kukizaki



شکل ۴ - فرآیند تولید نانو حباب‌های حجمی (BNB) به روش غشایی: (الف) حالت اولیه؛ (ب) مرحله اولیه رشد نانو حباب‌ها؛ (ج) رشد نانو حباب‌ها تا رسیدن به قطری برابر با قطر منفذ؛ (د) مرحله رشد مداوم نانو حباب‌ها؛ (هـ) جدا شدن نانو حباب‌ها [۲۲]



شکل ۵ - نمودار شماتیک از سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده برای تهیه نانو حباب‌های حجمی (BNB) به روش غشای SPG [۲۳]

به وسیله تنظیم اندازه منافذ غشا کنترل شود. *احمد*[۱] و *همکاران* [۲۴] از غشاهای سرامیکی لوله‌ای برای تهیه نانوحباب‌ها استفاده کردند و مشاهدات نشان داد که اندازه نانوحباب‌ها مستقیماً تحت تأثیر فشار مختلفی که هوای وارد شده به آب اعمال می‌شد، متغیر بود. اندازه نانوحباب‌ها تحت شرایط فشار ورود یکسان به وسیله غشا سرامیکی لوله‌ای تعیین می‌شد، که با نتایج آزمایش *کاکیزاکی* و *همکاران* [۲۳] هم‌خوانی داشت. این نشان می‌دهد که غشاهای لوله‌ای می‌توانند نقش مهمی در کنترل اندازه نانوحباب‌ها ایفا کنند. *ژانگ*[۲] و *همکاران* [۱۸] یک روش فیزیکی بر اساس غشا برای تهیه نانوحباب‌هایی با اندازه‌های کنترل‌شده توسعه دادند. در این روش، غشا به عنوان یک فیلتر برای کنترل اندازه نانوحباب‌ها به کار می‌رفت. نتایج نشان داد که غشا نه فقط قادر به تخریب حباب‌های بزرگ به حباب‌های کوچک‌تر است، بلکه می‌تواند حباب‌های کوچک را نیز به حباب‌های بزرگ‌تر ادغام کند. این ویژگی، قابلیت کنترل دقیق اندازه نانوحباب‌ها را افزایش می‌دهد.

متغیرهای اصلی که بر تولید و ویژگی نانوحباب‌های حجمی با این روش اثر می‌گذارند به شرح زیر است:

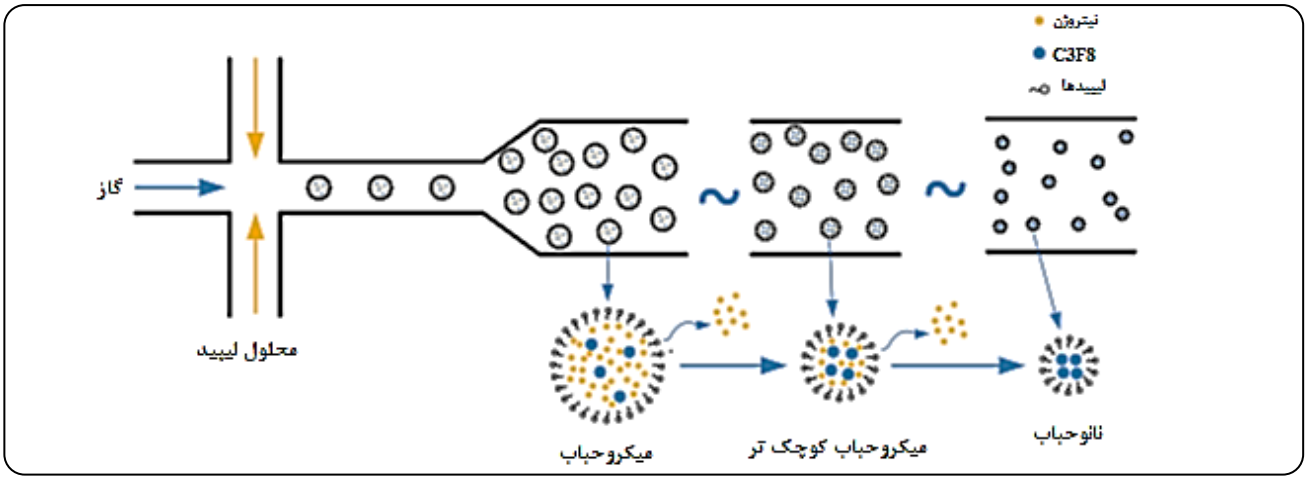
- قطر منافذ غشا: اندازه نانوحباب‌های تولیدی را تعیین می‌کند.
- فشار عبور گاز یا محلول: بر تراکم و سرعت تولید نانوحباب‌ها اثر دارد.
- دمای محلول: بر پایداری و حجم نانوحباب‌ها اثر می‌گذارد.

روش میکروفلوئیدیک در تولید نانوحباب‌های حجمی

روش میکروفلوئیدیک یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های تولید نانوحباب‌های حجمی (BNBs) است که امکان کنترل بسیار دقیق اندازه و توزیع حباب‌ها را فراهم می‌کند. این روش بر پایه تراشه‌های میکروفلوئیدیک عمل می‌کند که از طریق آن‌ها جریان‌های گاز و مایع به صورت جداگانه وارد می‌شوند و در نقاط تعامل خاصی با هم برخورد کرده و حباب‌هایی با اندازه کنترل‌شده تولید می‌کنند [۲۵] (شکل ۶).

در این روش، مخلوطی از گازها از طریق ورودی گاز به داخل تراشه میکروفلوئیدیک وارد می‌شود. این گاز در هنگام عبور از فاز مایع تحت تأثیر نیروهای ویسکوز قرار می‌گیرد و منجر به تشکیل میکروحباب‌هایی با اندازه مشخص می‌شود. سپس، بخشی از گاز موجود در این حباب‌ها در مایع حل شده و باعث کاهش حجم حباب‌ها می‌شود. در نهایت، این فرآیند منجر به تشکیل نانوحباب‌های حجمی (BNBs) با اندازه‌ای کوچک‌تر از میکروحباب‌های اولیه می‌شود. در یکی از مطالعات پیشرو، *ژو*[۳] و *همکاران* [۲۶] اولین کسانی بودند که از این روش برای تولید نانوحباب استفاده کردند. در این آزمایش، مخلوطی از نیتروژن (که در آب محلول است) و پرفلوروکربن (PFC) (که در آب محلول نیست) به عنوان فاز گازی استفاده شد. در ابتدا، میکروحباب‌های یکنواختی با استفاده از این مخلوط گازی تولید شدند. سپس، با حل شدن نیتروژن در محیط آبی، حباب‌ها به تدریج

(۱) Ahmed
(۲) Zhang
(۳) Xu



شکل ۶ – نمودار شماتیک از سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده برای تهیه نانو حباب‌های حجمی (BNBs) به کمک میکروفلوییدیک [۲۵]

کوچک‌تر شده و نانوحباب‌هایی با اندازه کنترل‌شده بدست آمدند. این روش امکان کنترل دقیق اندازه نانوحباب‌ها را از طریق تنظیم نسبت گازهای محلول و غیر محلول در آب فراهم کرد. به این ترتیب، اندازه نهایی نانوحباب‌ها قابل برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی بود. یکی از مهم‌ترین مزایای این روش، دقت بالای آن در تولید نانوحباب‌هایی با اندازه یکنواخت و قابل پیش‌بینی است. این قابلیت در مقایسه با سایر روش‌ها برجسته است و آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهایی که نیازمند کنترل دقیق اندازه حباب‌ها هستند، مانند تصویربرداری پزشکی، رهایش دارو و مهندسی بافت تبدیل می‌کند.

متغیرهای اصلی که بر تولید و ویژگی نانوحباب‌های حجمی با این روش اثر می‌گذارند به شرح زیر است:

- سرعت جریان مایع و گاز: کنترل قطر و یکنواختی نانوحباب‌ها.
- طراحی هندسی کانال‌ها: شکل و هندسه کانال‌های میکروفلوئیدیک تعیین‌کننده تراکم و اندازه نانوحباب‌هاست.
- دمای محلول و فشار کاری: بر پایداری و اندازه حباب‌ها تأثیر می‌گذارد.

روش کاویتاسیون صوتی در تولید نانوحباب‌های حجمی

کاویتاسیون صوتی یکی از روش‌های مؤثر برای تولید نانوحباب‌های حجمی (BNBs) است که از امواج صوتی با شدت بالا یا چرخش سریع یک پره برای ایجاد فشار منفی لحظه‌ای در مایع استفاده می‌کند. این فشار منفی باعث تشکیل حباب‌هایی در اطراف هسته‌های گازی بسیار کوچک می‌شود که در نهایت به نانوحباب‌های حجمی تبدیل می‌شوند[۲۷]. در یک مطالعه مهم، *نیرمالکار*[۱] و *همکاران* [۲۸] از این روش برای تولید نانوحباب‌ها استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از دستگاهی مطابق شکل ۷، مشاهده کردند که نانوحباب‌ها فقط در آب خالص تشکیل می‌شوند و در حلال‌های آلی وجود ندارند. علاوه بر این، وقتی نسبت حلال آلی به آب به مقدار مشخصی برسد، نانوحباب‌ها ناپدید می‌شوند. این پدیده به دلیل وجود بار الکتریکی روی سطح نانوحباب‌ها است که از طریق جذب یون‌های هیدروکسیل حاصل از خودیونیزاسیون آب، پایداری آن‌ها را فراهم می‌کند. با این حال، حلال‌های آلی فاقد این خاصیت هستند. روش کاویتاسیون صوتی به دلیل قابلیت تولید سریع و موثر نانوحباب‌ها، در حوزه‌هایی مانند تصویربرداری پزشکی، پاکسازی زیست‌محیطی و واکنش‌های شیمیایی کاربرد گسترده‌ای دارد. با این حال، نیاز به تجهیزات گران‌قیمت و کنترل دقیق پارامترهای عملیاتی از جمله معایب این روش محسوب می‌شود.

متغیرهای اصلی که بر تولید و ویژگی نانوحباب‌های حجمی با این روش اثر می‌گذارند به شرح زیر است:

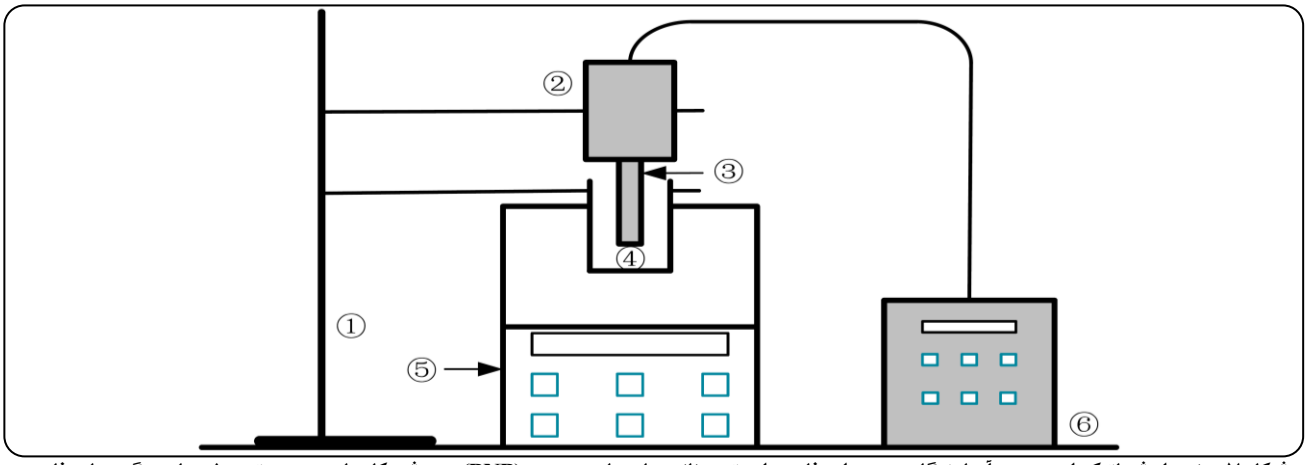
- فرکانس و شدت صوتی: اندازه و تعداد نانوحباب‌ها وابسته به شدت و فرکانس موج است.
- زمان اعمال صوت: طول مدت فرآیند بر تراکم و یکنواختی حباب‌ها اثرگذار است.
- دمای محلول: بر سرعت هسته زایی و پایداری تأثیر دارد.

روش کاویتاسیون هیدرودینامیکی در تولید نانوحباب‌های حجمی

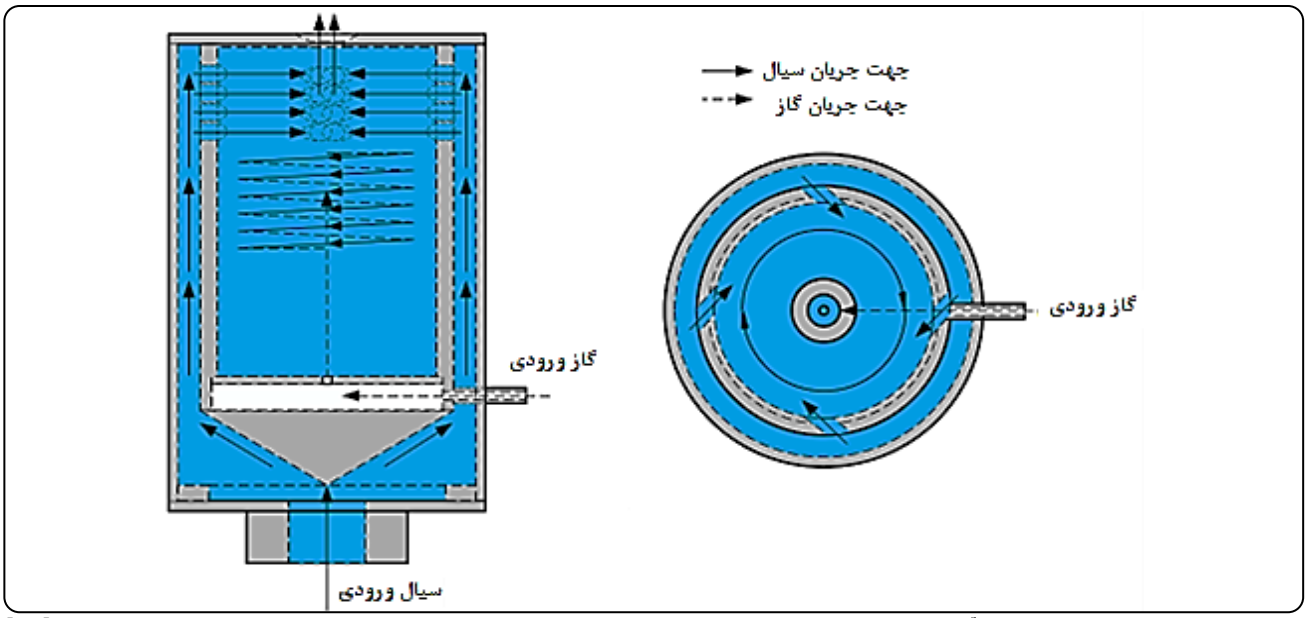
کاویتاسیون هیدرودینامیکی یک روش مناسب برای تولید نانوحباب‌ها در مقیاس بزرگ است که به دلیل هزینه پایین، بازده انرژی بالا و قابلیت مقیاس‌پذیری، از روش‌های محبوب در صنایع بزرگ محسوب می‌شود. در این روش، تغییرات سرعت جریان مایع باعث ایجاد نوسانات فشاری می‌شود که منجر به تشکیل حباب‌هایی در محدوده نانو می‌شود [۲۹]. *عالم*[۲] و *همکاران* [۳۰] از یک نازل جت چرخشی دو محفظه‌ای برای تولید نانوحباب‌ها با استفاده از کاویتاسیون هیدرودینامیکی استفاده کردند. دستگاه ایشان با استفاده از یک سیستم گردشی، قادر به تولید نانوحباب‌هایی با قطر کمتر از ۲۰۰ نانومتر بود که در آب دارای بار منفی بودند.

(۱) Nirmalkar

(۲) Alam



شکل ۷ – نمودار شماتیک از سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده برای تهیه نانو حباب‌های حجمی (BNB) به روش کاویتاسیون صوتی: ۱ – پایه و گیره‌های فلزی؛ ۲ – مبدل فراصوت؛ ۳ – پروب تیتانیومی؛ ۴ – بشر شیشه‌ای؛ ۵ – خنک‌کننده گردشی؛ ۶ – دستگاه پردازش فراصوت [۲۸]



شکل ۸ – نمودار شماتیک از سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده برای تهیه نانو حباب‌های حجمی (BNBs) به کمک کاویتاسیون هیدرودینامیکی [۳۰]

این بار منفی به پایداری بیشتر نانوحباب‌ها کمک کرد (شکل ۸). *وو*[1] و *همکاران* [۳۱] در مطالعه‌ای دیگر، راکتور کاویتاسیون را بهینه کردند. این گروه از شبیه‌سازی عددی برای بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر ساختار جریان استفاده کردند و طراحی بهینه را شناسایی کردند. سپس یک دستگاه آزمایشگاهی نوع گردابی برای تولید میکرو – نانوحباب ساختند. این دستگاه توانست حباب‌هایی با قطر حداقل ۳۰۱ نانومتر تولید کند.

متغیرهای اصلی که بر تولید و ویژگی نانوحباب‌های حجمی با این روش اثر می‌گذارند به شرح زیر است:

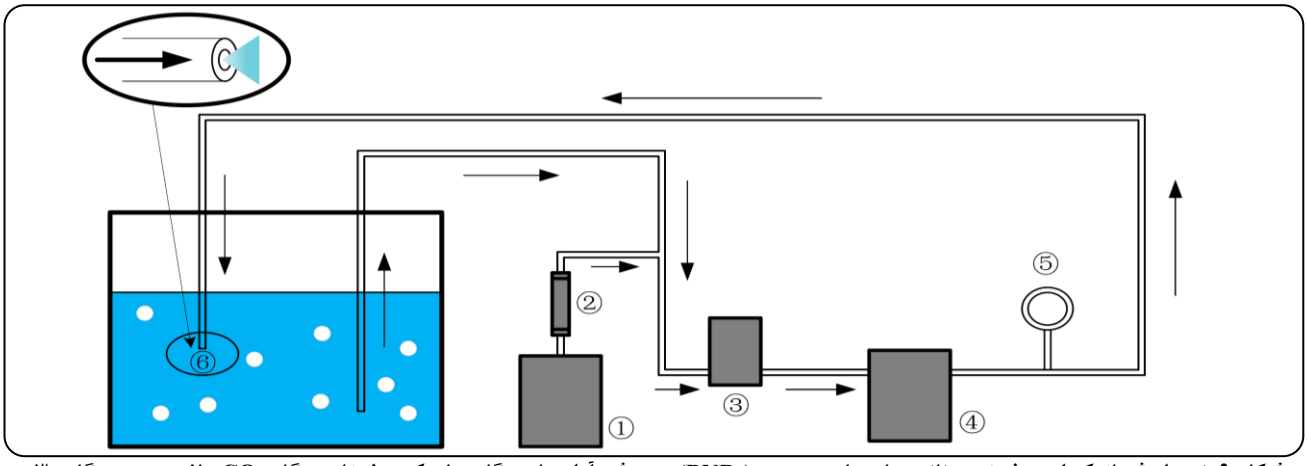
– دبی جریان و طراحی ونتوری / نازل: شدت و تعداد حباب‌ها را تعیین می‌کند.

– فشار و دمای محلول: پارامترهای مؤثر بر هسته زایی و پایداری حباب‌ها.

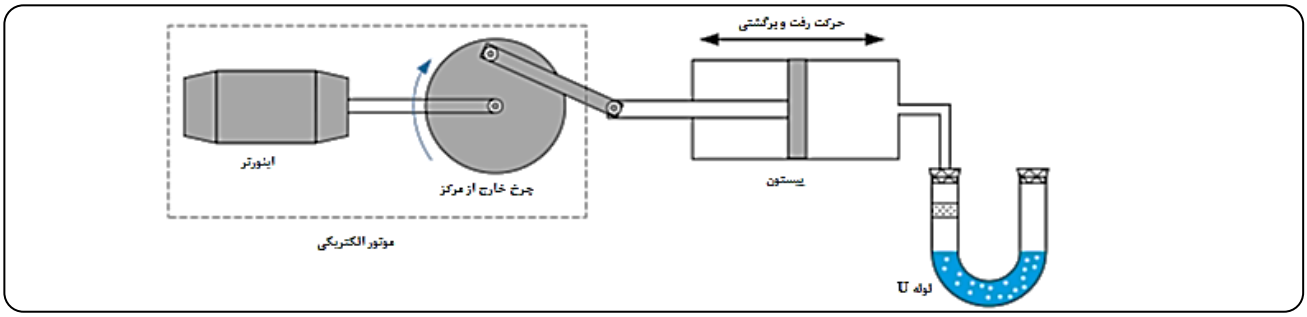
روش آزادسازی گاز حل شده در تولید نانوحباب‌های حجمی

روش آزادسازی گاز حل شده یکی از روش‌های متداول برای تولید نانوحباب‌های حجمی (BNBs) است که بر اساس ایجاد شرایط مناسب برای حل شدن گاز در مایع و سپس آزاد شدن آن عمل می‌کند. در این روش، ابتدا فشار محیط افزایش یافته تا گاز در مایع حل شود، سپس فشار کاهش می‌یابد و گاز به صورت حباب از محلول خارج می‌شود [۳۲]. اندازه حباب‌های تولید شده به انحلال‌پذیری گاز در محلول وابسته است. هرچه گاز در مایع حل‌پذیرتر باشد، قطر حباب‌های تشکیل شده کوچک‌تر خواهد بود. به عنوان مثال، انحلال‌پذیری دی‌اکسید کربن (CO_2) در آب خالص بدون تشکیل هیدرات با افزایش دما کاهش می‌یابد، اما در حضور هیدرات‌ها، این رابطه معکوس است

(۱) Wu



شکل ۹. نمودار شماتیک از هدف تهیه نانو حباب‌های حجمی (BNBs) به روش آزادسازی گاز: ۱- کپسول تامین گاز CO_2؛ ۲-دبی‌سنج گاز؛ ۳- پمپ دیافراگمی؛ ۴- مخزن گاز محلول؛ ۵ - مانومتر هیدرولیکی؛ ۶- نازل کاهش دهنده فشار برای گاز آزاد شده [۳۳]



شکل ۱۰. نمودار شماتیک از دستگاه مورد استفاده برای تهیه نانو حباب‌های حجمی (BNBs) به کمک روش تغییر متناوب فشار [۳۵]

و با افزایش دما، انحلال‌پذیری CO_2 افزایش می‌یابد. *وانگ*[۱] و *همکاران* [۳۳] در یک مطالعه آزمایشی از دی‌اکسید کربن به عنوان منبع گازی استفاده کردند و نانوحباب‌ها را به کمک روش آزادسازی گاز حل شده تولید کردند. دستگاه آزمایشگاهی ایشان در شکل ۹ نشان داده شده است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نسبت بهینه گاز به مایع برای تولید نانوحباب ۲٪/۸۷، زمان بهینه عملیاتی دستگاه ۲۸/۴۷ دقیقه و دمای بهینه ورودی آب ۲۵/۵۲ درجه سلسیوس است. این یافته‌ها می‌توانند راهنمای مناسبی برای بهینه‌سازی این روش در کاربردهای صنعتی و آزمایشگاهی باشند.

متغیرهای اصلی که بر تولید و ویژگی نانوحباب‌های حجمی با این روش اثر می‌گذارند به شرح زیر است:

- میزان اشباع گاز در محلول: بیشترین عامل تعیین‌کننده تعداد و حجم نانوحباب‌ها.
- سرعت کاهش فشار یا تغییر دما: باعث هسته‌زایی و کنترل اندازه می‌شود.

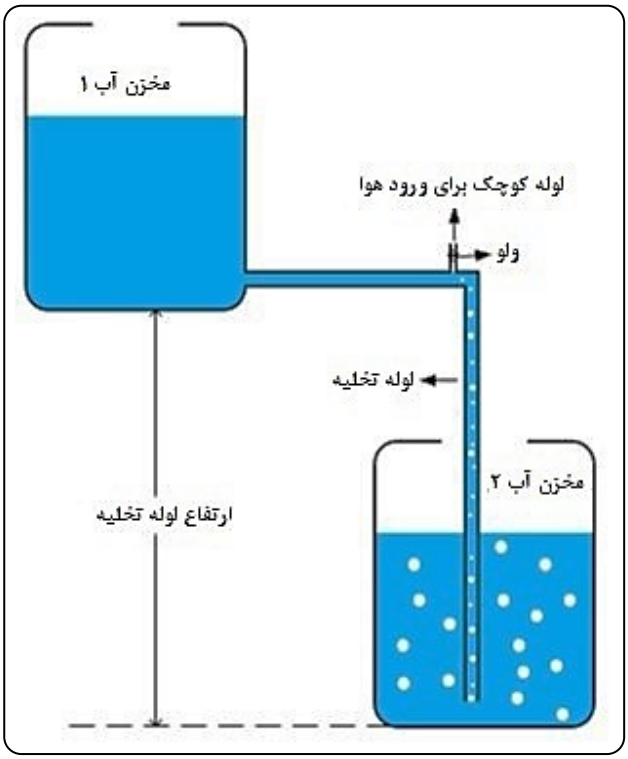
روش تغییر فشار دوره‌ای در تولید نانوحباب‌های حجمی

روش تغییر فشار دوره‌ای یکی از روش‌های جالب توجه در تولید نانوحباب است که بر اساس اعمال تغییرات متناوب فشار بر روی محلولی اشباع از گاز عمل می‌کند. این روش امکان کنترل دقیق انحلال و رسوب گاز را فراهم می‌کند و منجر به تشکیل نانوحباب‌هایی با اندازه کنترل‌شده می‌شود [۳۴]. در یکی از مطالعات پیشرو، *وانگ* و *همکاران* از این روش برای تولید نانوحباب‌های نیتروژن (N_2) استفاده کردند[۳۵]. آن‌ها از آرایش آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل ۱۰ بهره بردند و موفق به تولید نانوحباب‌هایی پایدار شدند. نتایج نشان داد که با ثابت نگه داشتن فرکانس تغییرات فشار، افزایش زمان قرار گرفتن محلول در معرض فشار، منجر به تشکیل نانوحباب‌هایی با قطر کوچک‌تر می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که روش تغییر فشار دوره‌ای یک روش کنترل‌پذیر و قابل اعتماد برای تولید نانوحباب‌هایی با اندازه یکنواخت است، که می‌تواند در کاربردهایی که نیازمند دقت بالا در اندازه حباب‌ها هستند، کاربرد فراوانی داشته باشد.

متغیرهای اصلی که بر تولید و ویژگی نانوحباب‌های حجمی با این روش اثر می‌گذارند به شرح زیر است:

- دامنه و فرکانس تغییرات فشار: کنترل کننده اندازه و تراکم نانوحباب‌ها.
- دمای محلول: بر حل‌پذیری گاز و پایداری اثرگذار است.

(۱) Wang



شکل ۱۱ – نمودار شماتیک از سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده برای تهیه نانو حباب‌ها به روش HAC [۳۶].

روش فشرده‌سازی هوای هیدرولیکی در تولید نانوحباب‌های حجمی

روش فشرده‌سازی هوای هیدرولیکی یکی از جدیدترین و مؤثرترین روش‌های تولید نانوحباب‌های حجمی (BNBs) است که به دلیل قابلیت تولید در مقیاس بزرگ و کارایی بالا، توجه زیادی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است. این روش بر اساس استفاده از فشار هوای فشرده در محیط مایع عمل می‌کند و منجر به تشکیل نانوحباب‌هایی پایدار با قطر بسیار کوچک می‌شود.

در یکی از مطالعات پیشرو، یانگ آزمایشی انجام داد که در آن از روش فشرده‌سازی هوای هیدرولیکی برای تولید نانوحباب‌ها استفاده شد[۳۶]. آرایش آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این آزمایش برای اولین بار ثابت کرد که این روش می‌تواند به طور موثر برای تولید نانوحباب‌ها به کار گرفته شود. در این مطالعه، از تحلیل ردیابی ذرات نانومتری (Nanoparticle TrackingAnalysis - NTA) برای تعیین توزیع اندازه و غلظت نانوحباب‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع لوله خروجی، غلظت نانوحباب‌ها افزایش می‌یابد. این امر نشان‌دهنده تأثیر مستقیم پارامترهای هیدرودینامیکی بر کارایی این روش است.

یکی از مهم‌ترین مزایای این روش، توانایی تولید انبوه نانوحباب‌ها در مقایسه با سایر روش‌های موجود است. همچنین، این روش از نظر هزینه‌های عملیاتی بسیار مقرون‌به‌صرفه بوده و به راحتی قابلیت مقیاس‌پذیری در سطح صنعتی را دارد. علاوه بر این، سادگی ساختار دستگاه و عدم نیاز به تجهیزات پیچیده، این روش را به یکی از گزینه‌های مناسب برای تولید در محیط‌های صنعتی و کشاورزی تبدیل کرده است. با توجه به نتایج مثبت بدست آمده از این روش، انتظار می‌رود که فناوری فشرده‌سازی هیدرولیک هوایی در آینده در حوزه‌های مختلفی از جمله کشاورزی (بهبود کیفیت آب و خاک)، صنعت (تصفیه فاضلاب و تمیزکاری سطوح)، و حتی در حوزه‌های زیست‌محیطی (اکسیژن‌رسانی به آب‌های سطحی) کاربرد گسترده‌ای داشته باشد.

متغیرهای اصلی که بر تولید و ویژگی نانوحباب‌های حجمی با این روش اثر می‌گذارند به شرح زیر است:

- میزان فشار و نرخ تزریق گاز: کنترل‌کننده اندازه و تراکم نانوحباب‌ها.
- زمان اعمال فشار: طول مدت فشرده‌سازی بر یکنواختی و پایداری حباب‌ها مؤثر است.
- ویسکوزیته و دمای محلول: بر روند هسته زایی و پایداری اثر دارد.

برای انتخاب روش مناسب تولید نانوحباب‌ها، مقایسه کمی بین تکنیک‌های مختلف ضروری است. جدول ۲ به ارزیابی هشت روش رایج بر اساس پارامترهایی همچون هزینه تجهیزات، زمان تولید، قابلیت کنترل اندازه و یکنواختی توزیع، و مقیاس‌پذیری پرداخته است. این مقایسه نشان می‌دهد که هر روش مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارد و انتخاب بهترین تکنیک باید براساس کاربرد مورد نظر، حجم تولید، و نیاز به یکنواختی و پایدار بودن نانوحباب‌ها انجام شود. به‌عنوان مثال، روش میکروفلوئیدیک دقت و یکنواختی بالایی ارائه می‌دهد ولی مقیاس‌پذیری محدودی دارد، در حالی که کاویتاسیون هیدرودینامیکی برای تولید صنعتی مناسب‌تر است. این ارزیابی به پژوهشگران و مهندسان کمک می‌کند تا تکنیک بهینه را برای کاربردهای تحقیقاتی یا صنعتی خود انتخاب کنند.

روش‌های تهیه نانوحباب‌های سطحی (SBNs)

نانوحباب‌های سطحی (SBNs) حباب‌های کوچکی هستند که در مرز فصل مشترک مایع و جامد تشکیل می‌شوند. تهیه این نانوحباب‌ها نه تنها نیازمند در نظر گرفتن کشش سطحی مایع و انحلال‌پذیری گاز است، بلکه باید خاصیت آب‌گریزی یا آب‌دوستی سطح جامد نیز در نظر گرفته شود، زیرا هر سه این عوامل بر تشکیل و پایداری SBNs تأثیر می‌گذارند. در این فصل، روش‌های متداول تهیه نانوحباب‌های سطحی معرفی می‌شوند، از جمله الکترولیز آب، روش آب سرد، تبادل حلال، روش کاهش فشار وتابش مایکروویو. در پایان، مزایا و معایب هر یک از این روش‌ها در قالب جدول ۳ خلاصه شده‌اند.

جدول ۲ - مقایسه کمی روش‌های تولید نانوحباب‌ها

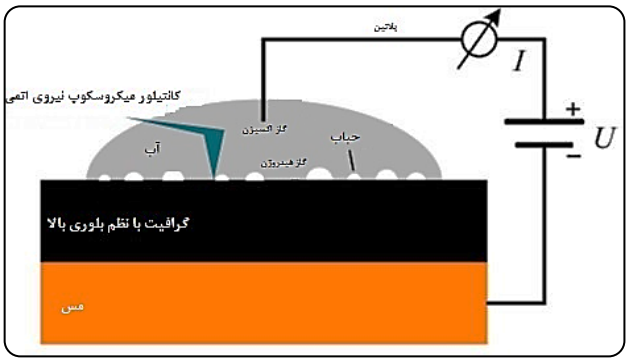
روش تولید	هزینه تجهیزات	زمان تولید	کنترل اندازه	یکنواختی توزیع	قابلیت مقیاس‌پذیری	توضیح مختصر
همزنی مکانیکی	کم	کوتاه	محدود	پایین	پایین	ساده و کم‌هزینه، مناسب حجم کم
غشا نانومنفذی	متوسط	متوسط	دقیق	بالا	متوسط–قابل ارتقا	تولید حباب‌های دقیق و یکنواخت
میکروفلوئیدیک	بالا	طولانی	بسیار دقیق	بسیار بالا	پایین	مناسب تحقیقات و کاربردهای آزمایشگاهی
کاویتاسیون صوتی	متوسط	کوتاه	متوسط	متوسط	متوسط	سریع و مؤثر، کنترل اندازه نیازمند بهینه‌سازی
کاویتاسیون هیدرودینامیکی	متوسط	کوتاه	متوسط	متوسط	بالا	مناسب تولید صنعتی، نیاز به تنظیم جریان
آزادسازی گاز حل شده	کم	کوتاه	محدود	پایین	متوسط	ساده و ارزان، مناسب مطالعات اولیه
تغییر فشار دوره‌ای	بالا	طولانی	دقیق	بالا	متوسط	پایدار و یکنواخت، نیازمند کنترل پارامترها
فشرده‌سازی هیدرولیک هوایی	متوسط–بالا	کوتاه	متوسط	متوسط	بالا	مناسب تولید صنعتی در حجم بالا

جدول ۳ - مزایا و معایب روش‌های تهیه نانو حباب‌های سطحی جامد–مایع.

روش‌ها	نوع	مزایا	معایب
روش الکترولیز محلول آبی	شیمی	اجازه کنترل دقیق بر سر تولید نانو حباب‌ها می‌دهد	نیاز به تجهیزات الکترولیز ویژه دارد
روش آب سرد	فیزیک	روشی ساده و قابل دسترسی است. نانو حباب‌ها بدون نیاز به تجهیزات پیچیده تولید می‌شوند	کنترل دقیق بر سر اندازه و ثبات حباب‌ها محدود است
روش تعویض حلال	فیزیک	اجرای آسان و مستقیم. هزینه پایین	کنترل بر سر اندازه و توزیع حباب‌ها ممکن است محدود باشد
روش کاهش فشار	فیزیک	اجازه تولید کنترل‌شده و سریع نانو حباب‌ها می‌دهد	نانو حباب‌های بدست آمده ناپایدار هستند
روش تابش مایکروویو	فیزیک	هیچ آلاینده‌ای به محلول اضافه نمی‌شود، و خروجی نانو حباب‌ها قابل کنترل است	نیاز به تجهیزات مایکروویو ویژه با کنترل دقیق قدرت دارد

روش الکترولیز محلول آبی در تولید نانوحباب‌های سطحی (SBNs)

روش الکترولیز یکی از روش‌های متداول برای تولید نانوحباب‌های سطحی (SBNs) است که در آن، با عبور جریان الکتریکی از آب، گازهای هیدروژن و اکسیژن تولید می‌شوند. این گازها در سطح الکترودها تجمع یافته و به صورت نانوحباب‌هایی در مرز فصل مشترک مایع–جامد تشکیل می‌شوند. این روش به دلیل قابلیت کنترل بالا و قابلیت اطمینان، از جمله روش‌های پرکاربرد در آزمایش‌های نانوحبابی است. در فرآیند الکترولیز، آب به دو گاز هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌شود. وقتی غلظت این گازها به حد بحرانی لازم برای تشکیل هسته برسد، حباب‌ها شروع به تشکیل می‌کنند. متوسط اندازه حباب‌ها با افزایش ولتاژ اعمالی کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش سرعت واکنش الکتروشیمیایی، گازهای بیشتری در زمان کوتاه‌تری تولید می‌شوند و حباب‌های کوچک‌تری تشکیل می‌دهند. برای تولید نانوحباب‌های سطحی پایدار، استفاده از الکترودهای مناسب ضروری است. یکی از مواد رسانای پرکاربرد در این زمینه، گرافیت پیرولیتیک با نظم بالا (HOPG) است[۳۷]. این ماده دارای سطحی صاف و همگن است که به خوبی برای تشکیل و پایداری نانوحباب‌ها مناسب است. در یکی از مطالعات برجسته، *یانگ* از روش الکترولیز برای تولید نانوحباب‌های سطحی استفاده کرد. آرایش آزمایشگاهی ایشان در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این آزمایش، سطح HOPG به عنوان الکترود استفاده شد و تشکیل نانوحباب‌ها با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش ولتاژ، حجم و پوشش سطحی نانوحباب‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲ - نمودار شماتیک از تهیه نانو حباب‌ها به روش الکترولیز [۳۸]

همچنین مشخص شد که نانوحباب‌های هیدروژن به مقدار بیشتری نسبت به نانوحباب‌های اکسیژن تولید می‌شوند. این تفاوت به دلیل سرعت بیشتر تولید هیدروژن در الکترود منفی (کاتد) نسبت به اکسیژن در الکترود مثبت (آند) است. روش الکترولیز دارای چندین مزیت است:

- کنترل دقیق بر روی اندازه و چگالی نانوحباب‌ها
- قابلیت استفاده در سطوح مختلف
- تولید نانوحباب‌های پایدار در زمان کوتاه

متغیرهای اصلی که بر تولید و ویژگی نانوحباب‌های سطحی با این روش اثر می‌گذارند به شرح زیر است:

- ولتاژ و جریان الکتریکی: شدت و مدت اعمال جریان بر اندازه و چگالی نانوحباب‌ها تأثیر دارد.
- غلظت یون‌ها و نوع الکترولیت: میزان رسانایی و ترکیب شیمیایی محلول تعیین‌کننده نرخ تولید حباب است.

– دمای محلول: دما روی پایداری و اندازه نانوحباب‌ها اثر دارد.
– زمان الکترولیز: طول مدت فرایند تعیین‌کننده تراکم و توزیع حباب‌ها است.

این روش در حوزه‌هایی مانند مطالعات سطحی، کاهش اصطکاک در سیستم‌های میکروفلوئیدیک، و فناوری‌های نانو کاربرد گسترده‌ای دارد.

با این حال، استفاده از این روش نیازمند تجهیزات دقیق و شرایط کنترل‌شده است. همچنین، نیاز به الکترودهای خاص و نیاز به تجهیزات اندازه‌گیری دقیق از جمله محدودیت‌های این روش است.

روش آب سرد در تولید نانوحباب‌های سطحی (SBNs)

روش آب سرد یکی از روش‌های ساده و کاربردی برای تولید نانوحباب‌های سطحی (SBNs) است که بدون نیاز به تجهیزات پیچیده، می‌تواند نانوحباب‌هایی پایدار را در مرز فصل مشترک مایع–جامد تولید کند. این روش بر اساس قانون هنری عمل می‌کند که بر اساس آن، حلالیت گاز در مایع با افزایش دما کاهش می‌یابد [۳۹].

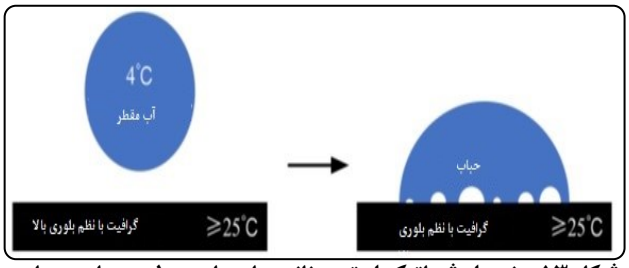
در این روش، از سطح گرم شده گرافیت پیرولیتی با نظم بالا (HOPG) و آب سرد خالص استفاده می‌شود. با قرار دادن سطح گرم‌شده در تماس با آب سرد، گازهای محلول در آب به دلیل کاهش دما به صورت نانوحباب‌هایی در سطح جامد ظاهر می‌شوند.

آن[1] و *همکاران* [۴۰] در یک آزمایش کلاسیک از این روش برای تولید نانوحباب‌های سطحی استفاده کردند (شکل ۱۳). آن‌ها در آزمایش خود:

– آب خالص را به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۴ درجه سلسیوس یا پایین‌تر نگه داشتند.
– سطح HOPG را در دماهای مختلف (۴۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس) به مدت دو ساعت در آون گرم کردند.
– سپس آب سرد را به سرعت روی سطح گرم شده HOPG پخش کردند.
– در نهایت، نمونه را در دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) قرار دادند تا تشکیل نانوحباب‌ها را بررسی کنند.

در تمامی دفعات آزمایش، وجود نانوحباب‌های سطحی تأیید شد. همچنین مشخص شد که با افزایش دمای سطح HOPG، چگالی نانوحباب‌ها افزایش یافت و نانوحباب‌ها به طور چشمگیری متراکم‌تر شدند. همچنین، عمر نانوحباب‌های تشکیل شده بیش از پنج روز بودکه نشان از پایداری بالای این حباب‌ها دارد.

مزایای روش آب سرد عبارتند از:
– سادگی فرآیند و عدم نیاز به تجهیزات گران‌قیمت
– قابلیت تکرار بالا
– تولید نانوحباب‌های پایدار در شرایط ساده



شکل ۱۳ – نمودار شماتیک از تهیه نانو حباب‌های سطحی جامد – مایع به روش آب سرد [۴۰]

چالش‌ها و محدودیت‌های این روش عبارتند از:
– وابستگی به دما و زمان نگهداری آب
– کنترل محدود بر روی اندازه و توزیع نانوحباب‌ها
– وابستگی به نوع سطح جامد و خواص آن

متغیرهای اصلی که بر تولید و ویژگی نانوحباب‌های سطحی با این روش اثر می‌گذارند به شرح زیر است:
– دمای آب: پایین بودن دما باعث افزایش حل‌پذیری گاز و پایداری حباب‌ها می‌شود.
– نوع و فشار گاز تزریقی: مشخص‌کننده اندازه و تعداد نانوحباب‌هاست.
– سرعت اختلاط یا همزدن: کنترل یکنواختی و توزیع حباب‌ها.

روش تبادل حلال در تولید نانوحباب‌های سطحی (SBNs)

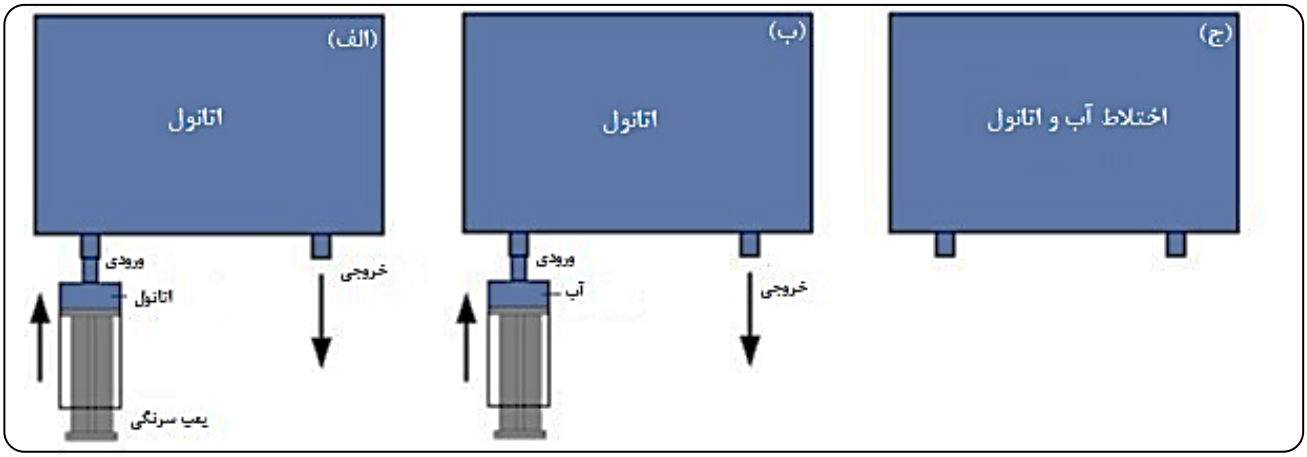
روش تبادل حلال یکی از روش‌های مؤثر برای تولید نانوحباب‌های سطحی (SBNs) است که بر اساس تغییر ناگهانی در حلالیت گازها در محیط مایع عمل می‌کند. این روش به طور گسترده در آزمایش‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفته است و دو نوع اصلی دارد:
– جایگزینی اتانول–آب
– جایگزینی محلول کلرید سدیم–آب

هر دو روش بر یک اصل مشترک استوارند: یک مایع با حلالیت گاز بالا به تدریج جایگزین مایعی با حلالیت گاز پایین می‌شود. این تغییر ناگهانی باعث آزاد شدن گازهای محلول و تشکیل نانوحباب‌هایی در سطح جامد می‌شود.

در این روش، ابتدا اتانول به عنوان حلال با حلالیت گاز پایین به ظرف اضافه می‌شود. سپس به آرامی آب خالص که دارای حلالیت گاز بالاتری است به آن اضافه می‌گردد. در نتیجه، گازهای محلول در آب به صورت نانوحباب‌ها در سطح جامد ظاهر می‌شوند. این روش به دلیل سادگی و کارایی بالا، یکی از روش‌های متداول برای تولید نانوحباب‌های سطحی است.

در یکی از مطالعات پیشرو، *کیو* و *همکاران* [۴۱] از روش تبادل حلال (اتانول–آب) برای تولید نانوحباب‌های سطحی استفاده کردند.

(۱) An



شکل ۱۴ - نمودار شماتیک از تهیه نانو حباب‌های سطحی به روش تعویض محلول الکل-آب. (الف) الکل (اتانول) با استفاده از سرنگ به درون ظرف مایع بسته تزریق می‌شود؛ (ب) سپس، الکل با آب دی یونیزه جایگزین می‌شود؛ (ج) حباب‌ها در زمان جایگزینی الکل با محلول آب تشکیل می‌شوند [۴۱]

آرایش آزمایشگاهی ایشان در شکل ۱۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که این روش می‌تواند تعداد زیادی نانوحباب تولید کند.

برای بررسی دقیق‌تر، نویسندگان از دستگاه تحلیل ذرات نانومتری ردیابی‌کننده (NTA) استفاده کردند تا اندازه و غلظت نانوحباب‌های تشکیل شده را اندازه‌گیری کنند. یافته‌ها نشان داد که هرچه مقدار گاز حل شده در محلول بیشتر باشد، تعداد نانوحباب‌های تشکیل شده نیز بیشتر خواهد بود. مزایای روش تبادل حلال عبارت است از:

- سادگی فرآیند و عدم نیاز به تجهیزات پیچیده
- تولید نانوحباب‌های متراکم و یکنواخت
- قابلیت استفاده در محیط‌های آزمایشگاهی مختلف

چالش‌ها و محدودیت‌های این روش عبارتند از:

- وابستگی به نوع حلال و خواص آن
- نیاز به دقت در زمان و نسبت ترکیب حلال‌ها
- امکان آلودگی سطح به دلیل استفاده از حلال‌های شیمیایی

متغیرهای اصلی که بر تولید و ویژگی نانوحباب‌های سطحی با این روش اثر می‌گذارند به شرح زیر است:

- نوع حلال و نسبت مخلوط: تفاوت در قطبیت و حلالیت گاز بر اندازه نانوحباب‌ها تأثیر دارد.
- سرعت تبادل حلال: سرعت اختلاط و انتقال فاز بر تراکم و اندازه حباب‌ها اثرگذار است.
- دمای محیط و فشار: پارامترهای کنترل‌کننده پایداری و عمر نانوحباب‌ها.

روش کاهش فشار در تولید نانوحباب‌های سطحی (SBNs)

روش کاهش فشار (Depressurization Method) یکی از روش‌های مؤثر برای تولید نانوحباب‌های سطحی (SBNs) است که بر اساس تغییر حلالیت گاز در مایع عمل می‌کند. این روش از این اصل استفاده می‌کند که با کاهش فشار محیط، حلالیت گاز در مایع کاهش می‌یابد و این امر منجر به آزاد شدن گاز و تشکیل نانوحباب‌هایی در مرز فصل مشترک مایع-جامد می‌شود. در این روش، مایعی که گاز را در خود حل کرده است تحت کاهش فشار قرار می‌گیرد. کاهش فشار باعث کاهش حلالیت گاز در مایع می‌شود، در نتیجه گاز به صورت نانوحباب‌ها از محلول خارج می‌شود. این فرآیند در سطوح جامد، به ویژه سطوح هیدروفوبیک مانند گرافیت پیرولیتی با نظم بالا (HOPG)، به خوبی اتفاق می‌افتد.

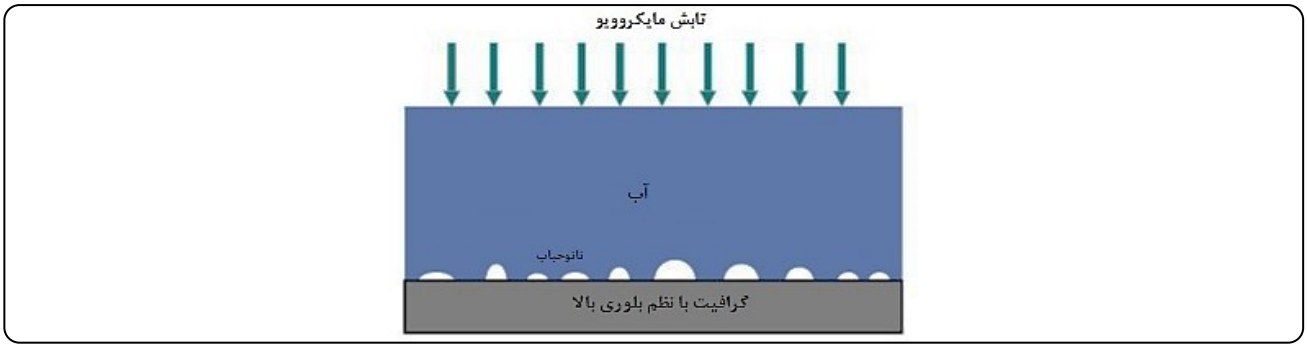
فانگ[۱] و *همکاران* [۴۲] آزمایشی انجام دادند تا کارایی این روش را در تولید نانوحباب‌های سطحی بسنجند. در این مطالعه، آب خالص غیراشباع روی سطح HOPG ریخته شد و سپس آزمایش کاهش فشار به مدت ۵ دقیقه انجام گرفت. در پایان، تشکیل نانوحباب‌ها با استفاده از دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) تأیید شد. این یافته نشان داد که کاهش موقت فشار باعث اشباع گاز در سطح HOPG شده و منجر به تشکیل نانوحباب می‌شود. با این حال، هنگامی که زمان کاهش فشار به ۲۰ دقیقه افزایش یافت، دیگر نانوحبابی تشکیل نشد. این موضوع نشان می‌دهد که پس از گذشت زمان طولانی، مولکول‌های گاز از مایع فرار کرده و دیگر قادر به تشکیل حباب نیستند. مزایای روش کاهش فشار عبارتند از:

- عدم نیاز به تجهیزات پیچیده یا واکنش‌های شیمیایی
- سرعت بالا در فرآیند تولید نانوحباب
- کاربرد در سطوح مختلف، به ویژه سطوح هیدروفوبیک

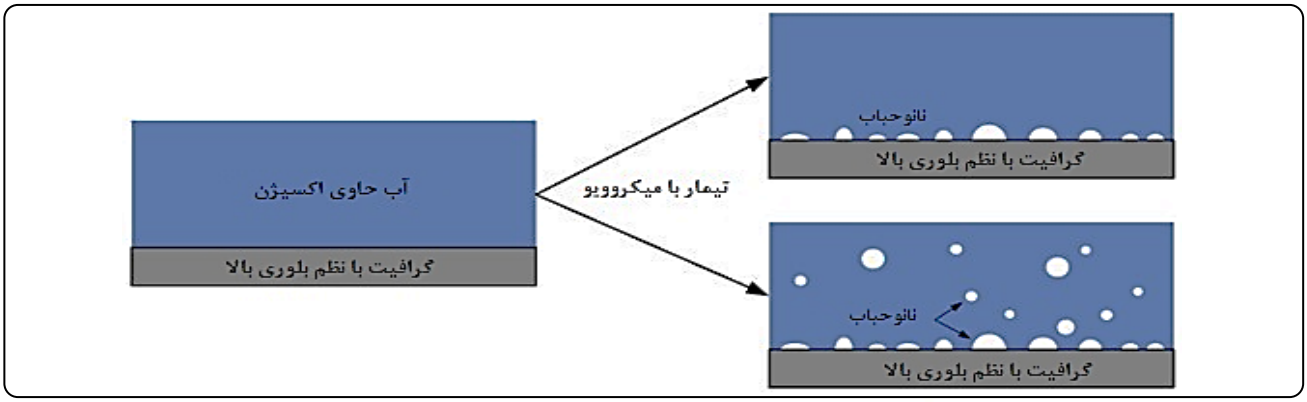
چالش‌ها و محدودیت‌های این روش عبارتند از:

- وابستگی به زمان کاهش فشار: زمان طولانی منجر به فرار گاز و عدم تشکیل نانوحباب می‌شود.
- نیاز به دقت در کنترل فشار و زمان
- وابستگی به نوع سطح جامد و خواص آن

(۱) Fang



شکل ۱۵ - نمودار شماتیک از تولید نانو حباب‌ها به کمک مایکروویو [۴۳]



شکل ۱۶ - مکانیزم پیشنهادی از تشکیل نانو حباب‌ها [۴۳]

متغیرهای اصلی که بر تولید و ویژگی نانوحباب‌های سطحی با این روش اثر می‌گذارند به شرح زیر است:

- فشار اولیه و نهایی: اختلاف فشار اصلی‌ترین عامل در هسته زایی حباب‌ها است.
- سرعت کاهش فشار: بر اندازه و تعداد نانوحباب‌ها تأثیر مستقیم دارد.
- دمای مایع: دما بر انحلال گاز و پایداری حباب‌ها اثرگذار است.

روش تابش مایکروویو

روش تابش موج‌های الکترومغناطیسی یک روش مناسب و بدون آلاینده برای تهیه نانو حباب‌های سطحی (SNBs) است. فوتون‌ها هنگام برخورد با سطح، انرژی خود را منتقل می‌کنند و باعث افزایش احتمال جدا شدن گازهای محلول از سطح مشترک آب و هوا می‌شوند؛ که می‌تواند منجر به تشکیل حباب‌ها یا افزایش نرخ گاززدایی شود.

زیرا تحت تابش مایکروویو، محلول‌پذیری گاز در آب کاهش می‌یابد، که به تشکیل هسته‌های نانو حباب کمک می‌کند. نمودار شماتیک تولید حباب‌ها به کمک مایکروویو در شکل ۱۵ نشان داده شده است. فرضیه مکانیزم تولید نانو حباب‌ها به کمک تابش مایکروویو در یک کار تحقیقاتی آمده است. *وانگ*[۱] و *همکاران* مکانیزم تولید نانو حباب‌ها به کمک تابش مایکروویو را فرضیه کردند، که در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همچنین، آن‌ها آزمایش تهیه نانو حباب‌ها به کمک تابش مایکروویو انجام دادند. در این مطالعه، آزمایشی برای تولید نانوحباب‌ها با استفاده از تابش مایکروویو انجام شد. در این روش، از اکسیژن بسیار خالص (۹۹/۹۹۵ ٪) به عنوان منبع گاز برای تزریق به آب خالص بدون اکسیژن استفاده شد و گرافیت پیرولیتی با نظم بالا (HOPG) به عنوان بستر مورد استفاده قرار گرفت. قطعه تازه برش‌خورده HOPG درون آب اکسیژن‌دار قرار گرفت و سپس تابش مایکروویو به محلول تابانده شد تا نانوحباب‌های سطحی (SNBs) تشکیل شوند. مطالعه نشان داد که تنظیم میزان گاز، زمان تابش، و توان کاری می‌تواند تولید نانو حباب‌ها را کنترل کند[۴۳]. *یوان*[۲] و *همکاران* [۴۴] از تابش الکترون تسریع‌شده برای تهیه نانو حباب‌های حجمی (BNBs) در آب خالص استفاده کردند. نتایج نشان دادند که بین تشکیل نانو حباب‌ها و دوز تابش بالا یک رابطه مستقیم وجود دارد. علاوه بر این، با افزایش دوز تابش، ابتدا مقدار نانو حباب‌ها افزایش می‌یابد، اما بعداً با ادامه تابش، میزان آن کاهش می‌یابد.

متغیرهای اصلی که بر تولید و ویژگی نانوحباب‌های سطحی با این روش اثر می‌گذارند به شرح زیر است:

- توان و شدت تابش: تعیین‌کننده نرخ هسته زایی و اندازه نانوحباب‌هاست.
- زمان تابش: طول مدت تابش روی تراکم و پایداری حباب‌ها اثر دارد.
- ترکیب شیمیایی محلول: نوع یون‌ها و مواد افزودنی می‌تواند به تثبیت یا تخریب حباب‌ها کمک کند.

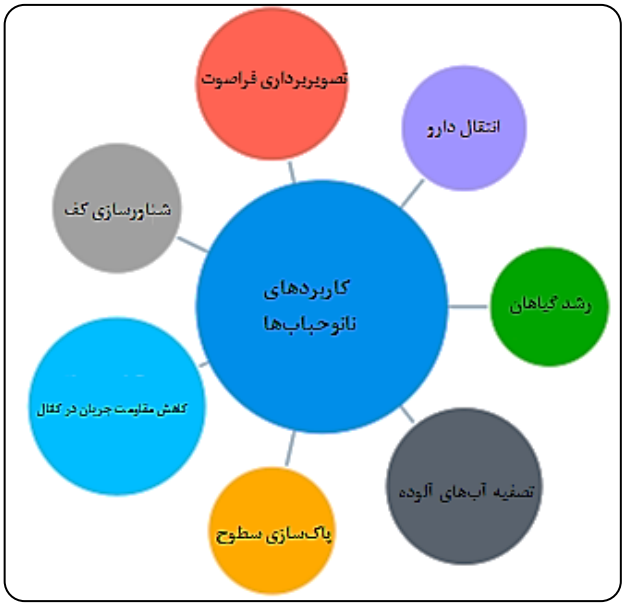
(۱) Wang

(۲) Yuan

جدول ۴ – مقایسه روش‌های تولید نانوحباب‌های سطحی: مزایا، محدودیت‌ها و قابلیت‌های عملیاتی

روش تولید	دقت کنترل اندازه	یکنواختی توزیع	هزینه تجهیزات	زمان تولید	مقیاس‌پذیری	توضیحات
الکترولیز محلول آبی	بالا	متوسط	متوسط	کوتاه	محدود	تولید نانوحباب‌ها از طریق واکنش الکتروشیمیایی در سطح الکترود؛ کنترل اندازه وابسته به ولتاژ و چگالی جریان
آب سرد	متوسط	متوسط	پایین	کوتاه	محدود	کاهش دما باعث افزایش اشباع گاز و تشکیل حباب‌های پایدار می‌شود؛ ساده و کم‌هزینه ولی مقیاس‌پذیری محدود
تبادل حلال	بالا	بالا	متوسط	متوسط	محدود	جایگزینی حلال محلول باعث آزادسازی حباب‌های سطحی می‌شود؛ کنترل دقیق اندازه ممکن است
کاهش فشار	متوسط	متوسط	متوسط	کوتاه	متوسط	کاهش فشار محیط باعث تشکیل نانوحباب‌های سطحی می‌شود؛ ساده ولی نیازمند تجهیزات مقاوم به فشار
تابش مایکروویو	متوسط	پایین	بالا	کوتاه	محدود	انرژی مایکروویو برای تحریک گاز محلول استفاده می‌شود؛ کارایی و یکنواختی ممکن است پایین‌تر از روش‌های دیگر باشد

روش‌های مختلفی برای تولید نانوحباب‌های سطحی معرفی شده‌اند که هر یک دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند. پارامترهایی مانند کنترل اندازه، یکنواختی توزیع، هزینه تجهیزات، زمان تولید و قابلیت مقیاس‌پذیری، نقش مهمی در انتخاب روش مناسب برای کاربردهای صنعتی و پژوهشی دارند. به‌عنوان مثال، روش الکترولیز محلول آبی امکان کنترل دقیق اندازه حباب‌ها را فراهم می‌کند اما مقیاس‌پذیری محدودی دارد، در حالی که روش آب سرد ساده و کم‌هزینه است ولی یکنواختی و کنترل اندازه کمتر است. روش‌های تبادل حلال و کاهش فشار نیز هر کدام ویژگی‌های منحصربه‌فردی برای ایجاد نانوحباب‌های سطحی دارند، و روش تابش مایکروویو با وجود هزینه بالاتر، امکان تولید سریع نانوحباب‌ها را فراهم می‌کند. جدول ۴ مقایسه‌ای کلی بین این روش‌ها ارائه می‌دهد تا مزایا و محدودیت‌های هر روش را به‌طور همزمان مشاهده و تحلیل شود.



شکل ۱۷ – حوزه‌های کاربردی نانو حباب‌ها.

کاربردهای نانوحباب‌ها

نانوحباب‌ها به دلیل خواص منحصر به فردی مانند پایداری بالا، سطح ویژه زیاد و قابلیت تعامل با سطوح مختلف، کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های پزشکی، کشاورزی و صنعت یافته‌اند (شکل ۱۷).

در ادامه به بررسی این کاربردها و روش‌های مناسب تهیه نانوحباب‌ها در هر یک از این زمینه‌ها پرداخته می‌شود.

نانوحباب‌ها در پزشکی به دو شکل عمده به کار می‌روند:

– عامل کنتراست در تصویربرداری فراصوتی

– ناقل دارو در سیستم‌های رهایش هدفمند

این کاربردها نیازمند نانوحباب‌هایی با توزیع اندازه باریک و پایداری بالا هستند. از این رو، روش‌های دقیقی مانند میکروفلوئیدیک و غشای نانومتخلخل برای تولید آن‌ها در محیط‌های پزشکی استفاده می‌شوند. این روش‌ها امکان کنترل دقیق اندازه، توزیع و غلظت نانوحباب‌ها را فراهم می‌کنند، که امری ضروری در کاربردهای تشخیصی و درمانی است.

در حوزه کشاورزی، نانوحباب‌ها به دلیل توانایی افزایش انتقال گاز به داخل خاک و آب، می‌توانند نفوذپذیری آب را بهبود دهند و جذب عناصر غذایی توسط گیاهان را افزایش دهند. همچنین، استفاده از نانوحباب‌ها در اکسیژن‌رسانی به ریشه گیاهان باعث تحریک رشد بهتر و افزایش عملکرد محصولات می‌شود.

با توجه به اینکه نیاز به کنترل دقیق اندازه و توزیع نانوحباب‌ها در کشاورزی کمتر است، می‌توان از روش‌های ساده‌تری مانند همزنی مکانیکی برای تولید آن‌ها استفاده کرد.

نانوحباب‌ها در حوزه صنعتی کاربردهای متنوعی دارند:

– تصفیه فاضلاب: نانوحباب‌ها به دلیل سطح ویژه بالای خود، ظرفیت واکنش‌های شیمیایی و جذب آلاینده‌ها را افزایش می‌دهند.

– تمیز کردن سطوح: در صنایع الکترونیک و خودرو، نانوحباب‌ها به عنوان ابزاری مؤثر برای تمیز کردن سطوح بدون آسیب‌رسانی به مواد حساس به کار می‌روند.

جدول ۵ - روش‌های مورد استفاده در حوزه کاربردهای نانو حباب‌ها.

حوزه کاربردی	روش‌های تهیه مناسب برای نانو حباب‌ها
تصویربرداری فراصوتی	روش میکروفلویدیک –روش غشا با دیواره‌های پوره نانومتری
دارورسانی	روش میکروفلویدیک – روش غشا با دیواره‌های پوره نانومتری
رشد گیاه	روش همزن مکانیکی
تصفیه آب شرب	روش کاویتاسیون صوتی
تمیزکاری سطح	روش همزن مکانیکی
کاهش مقاومت جریان در کانال‌ها	روش الکترولیز محلول آبی – روش تابش مایکروویو
شناورسازی فوم	روش کاویتاسیون صوتی

– کاهش مقاومت کانال‌ها: در سیستم‌های انتقال سیال، نانوحباب‌ها با کاهش اصطکاک، باعث بهبود جریان سیال می‌شوند.
– فرآیندهای شناورسازی کف: در صنایع معدنی، نانوحباب‌ها به بهتر شدن جداسازی مواد کمک می‌کنند.

با توجه به تنوع شرایط صنعتی، روش‌های متنوعی برای تولید نانوحباب‌ها در این حوزه‌ها وجود دارد که در جدول ۵ به طور خلاصه آورده شده‌اند.

کاربرد نانوحباب‌ها در تصویربرداری فراصوتی

تصویربرداری فراصوتی یکی از روش‌های پرکاربرد در تشخیص‌های پزشکی است که به دلیل عدم تهاجم، ایمنی بالا، قابلیت استفاده مکرر و هزینه پایین، در بسیاری از مراکز درمانی و تشخیصی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۵]. یکی از چالش‌های این روش، کم بودن توانایی کنتراست بافت‌های نرم است. این مشکل با استفاده از عوامل کنتراستی مبتنی بر نانوحباب به طور مؤثری برطرف می‌شود.

نانوحباب‌ها در حضور امواج فراصوت، دچار فشرده‌سازی و انبساط مداوم می‌شوند که این فرآیند منجر به تولید سیگنال‌های صوتی منحصربه‌فردی می‌شود. این سیگنال‌ها قوی‌تر از سیگنال‌های بافت‌های اطراف هستند، از این رو نانوحباب‌ها به عنوان عوامل کنتراستی بسیار مؤثردر تصویربرداری فراصوتی به کار گرفته می‌شوند. نانوحباب‌ها به دلیل اندازه بسیار کوچک و پایداری بالا می‌توانند به راحتی از دیواره رگ‌های خونی عبور کنند و به مناطق خاصی از بدن نفوذ کنند و امکان تصویربرداری دقیق‌تری فراهم کنند.

لیو و *همکاران* [۴۶] نانوحباب‌هایی را با استفاده از دو رنگ چربی‌دوست و با ترکیب روش‌های FRET (انتقال انرژی تشدید فلورسانس) و BRET (انتقال انرژی تشدید بیولومینسانس) تولید کردند. این نوع نانوحباب‌ها قابلیت ایجاد تصویر با وضوح بالا را در حین تصویربرداری فراصوتی فراهم کردند. آن‌ها نشان دادند که میکروعروق بافت‌های خونرسانی شده را می‌توان با استفاده از این نانوحباب‌ها و به کمک تصویربرداری با کنتراست بالا به خوبی مشاهده کرد.

همچنین، این نانوحباب‌های BRET–FRET در تصویربرداری از مدل‌های حیوانی سرطان پستان به کار گرفته شدند و نشان دادند که این عوامل کنتراستی می‌توانند به طور مؤثری در تشخیص و پیگیری بیماری‌های توموری مورد استفاده قرار گیرند. مزایای نانوحباب‌ها در تصویربرداری فراصوتی عبارت است از:
– ایمنی بالا و عدم سمیت
– قادر به نفوذ در دیواره رگ‌ها و تجمع در بافت‌های هدف
– تولید سیگنال قوی‌تر نسبت به بافت‌های اطراف
– قابلیت استفاده در تصویربرداری دینامیک و زنده

چالش‌ها و محدودیت‌های این روش نیز عبارت است از:
– نیاز به کنترل دقیق اندازه و توزیع حباب‌ها
– نیاز به پایداری بالا در محیط بیولوژیکی
– بهینه‌سازی فرآیند تولید برای استفاده بالینی

نانوحباب‌ها و میکروحباب‌ها در کاربردهای بالینی، به ویژه در بیماری‌های عصبی، به‌عنوان ابزارهای نوین و دقیق برای تشخیص و درمان مورد توجه قرار گرفته‌اند. این ساختارهای گازی نانومقیاس با قابلیت حمل دارو و عوامل تصویربرداری، امکان رهایش هدفمند ترکیبات فعال به مناطق مشخصی از سیستم عصبی را فراهم می‌کنند و نفوذپذیری سد خونی–مغزی را بهبود می‌بخشند. علاوه بر این، فعال‌سازی نانوحباب‌ها با محرک‌های خارجی مانند فراصوت، امکان کنترل دقیق زمان و محل رهایش دارو یا عوامل تصویربرداری را فراهم می‌کند و اثرات جانبی سیستمیک را کاهش می‌دهد. این پیشرفت‌ها چشم‌اندازهای جدیدی برای توسعه روش‌های درمانی مبتنی بر نانوحباب‌ها در اختلالات نورولوژیک مانند آلزایمر، پارکینسون و سکته مغزی ایجاد کرده و آن‌ها را به فناوری میان‌رشته‌ای مؤثر در پزشکی عصبی تبدیل می‌کند [۴۷].

کاربرد نانوحباب‌ها در رهایش هدفمند دارو

نانوحباب‌ها به دلیل خواص منحصر به فرد خود، به عنوان ناقل‌های دارورسانی در پزشکی کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. این ذرات ریز به دلیل راندمان انتقال جرم بالا، می‌توانند داروها را به داخل بدن حمل کنند و با استفاده از تحریک‌های خارجی مانند میدان مغناطیسی یا فراصوت، دارو را به صورت کنترل‌شده و هدفمند رهایش کنند.

نانوحباب‌ها تحت اثر میدان مغناطیسی دارای خاصیت واکنش مغناطیسی هستند و زمانی که تحت تابش فراصوت قرار می‌گیرند، دچار رفتاری انفجاری می‌شوند که منجر به تخریب کنترل‌شده نانوحباب و افزایش نفوذپذیری غشای سلولی می‌گردد. این ویژگی‌ها آن‌ها را به ناقل‌های مؤثر در سیستم‌های رهایش داروی هدفمند تبدیل کرده است. این مکانیسم در شکل ۱۸ به خوبی نشان داده شده است.

سانلیر[1] و *همکاران* [۴۸] یک سیستم دارویی دوگانه نوین بر پایه نانوحباب‌ها برای درمان هدفمند سرطان ریه غیرکوچک‌سلولی (Non-Small Cell Lung Cancer) توسعه دادند. این سیستم از دو قابلیت بهره می‌برد:

– هدایت مغناطیسی: نانوحباب‌ها تحت میدان مغناطیسی به سمت هدف هدایت می‌شوند.

– پاسخگویی به فراصوت: با تابش فراصوت، دارو از نانوحباب آزاد شده و در محل مورد نظر اثر درمانی خود را برجسته می‌کند.

این سیستم امکان ارائه دارو با دقت بالا و کاهش اثرات جانبی را فراهم می‌کند و نشان‌دهنده پتانسیل بزرگ نانوحباب‌ها در درمان‌های شخصی‌سازی‌شده و دقیق است. *کاوالی*[2] و *همکاران* [۴۹] نانوحباب‌هایی را با هسته پرفلوروپنتان و پوسته کیتوسان تهیه کردند. آن‌ها با افزودن پلی‌وینیل‌پیرولیدون (PVP)، پایداری نانوحباب‌ها را افزایش دادند. این نانوحباب‌ها دارای ویژگی‌های مهمی هستند:

– قابلیت بالای حمل اکسیژن

– عدم سمیت سلولی

– رهایش مداوم اکسیژن در محیط‌های کم‌اکسیژن پس از اکسیژن‌دار کردن

این نوع نانوحباب‌ها می‌توانند در تسریع بهبود بافت‌های آسیب‌دیده و درمان شرایط هیپوکسیک (کمبود اکسیژن) مانند تومورهای جامد کاربرد داشته باشند. مزایای نانوحباب‌ها در رهایش دارو عبارتند از:

– پایداری بالا در محیط بیولوژیکی

– قادر به حمل داروهای هیدروفیلیک و لیپوفیلیک

– قابلیت فعال‌سازی با تحریک‌های خارجی (مغناطیس، فراصوت)

– افزایش نفوذپذیری غشای سلولی در حضور فراصوت

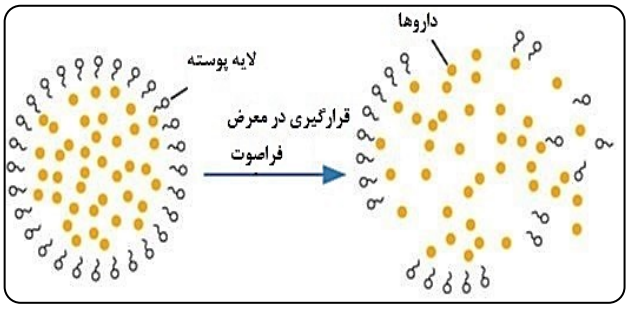
چالش‌ها و محدودیت‌ها نانوحباب‌ها در رهایش دارو عبارتند از:

– نیاز به بهینه‌سازی روش‌های تولید برای کاربرد بالینی

– کنترل دقیق اندازه و پایداری در محیط بدن

– نیاز به ارزیابی‌های بالینی بیشتر

گزارش‌های اخیر نشان می‌دهد که استفاده از نانوحباب‌ها در رهایش هدفمند دارو و مکمل‌های غذایی می‌تواند کارایی انتقال مواد فعال را بهبود بخشیده و جذب سلولی را افزایش دهد[۵۰]. ویژگی‌هایی نظیر اندازه نانومقیاس، سطح ویژه بالا و توانایی حمل گاز



شکل ۱۸ – فرآیند آزادسازی دارو به کمک نانو حباب‌ها [۴۸]

یا ترکیبات محلول، نانوحباب‌ها را قادر می‌سازد تا با نفوذپذیری بالا به بافت‌ها، دوز مؤثر دارو را به محل هدف برسانند و از انتشار نامطلوب در سایر قسمت‌های بدن جلوگیری کنند. افزون بر این، پایداری طولانی نانوحباب‌ها در محیط‌های زیستی و توانایی فعال‌سازی با محرک‌های خارجی مانند فراصوت یا تغییر pH، امکان کنترل دقیق زمان و مکان رهایش دارو را فراهم می‌آورد. این پیشرفت‌ها، نانوحباب‌ها را به ابزار نوین و میان‌رشته‌ای در حوزه دارورسانی و تغذیه عملکردی تبدیل کرده و افق‌های جدیدی را برای توسعه فناوری‌های پزشکی و بیوتکنولوژی باز می‌کنند[۵۰].

تأثیر نانوحباب‌ها بر رشد گیاهان

نانوحباب‌ها به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، تأثیرات چشم‌گیری در بهبود رشد گیاهان دارند. یکی از اصلی‌ترین دلایل این تأثیر، افزایش میزان اکسیژن محلول در آب است. این امر باعث تقویت فرآیند تنفس گیاهی می‌شود. همچنین، نانوحباب‌ها با کاهش کشش سطحی آب، باعث افزایش نفوذپذیری آب در خاک و جذب بهتر آن توسط ریشه گیاهان می‌شوند. علاوه بر این، نانوحباب‌ها دارای انرژی سطحی بالایی هستند و نقاط فعال شیمیایی زیادی دارند. این ویژگی‌ها به آن‌ها اجازه می‌دهند تا در تماس با باکتری‌های بیماری‌زا، دیواره سلولی آن‌ها را تخریب کنند و ایجاد اثر ضد میکروبی کنند[۵۱].

لیو و *همکاران* [۵۲] در یک آزمایش نشان دادند که استفاده از آب حاوی نانوحباب‌ها می‌تواند فرآیند جوانه‌زنی بذرها را تسریع کند، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت این فناوری در کشاورزی است.

کاربرد نانوحباب‌ها در تصفیه پساب

نانوحباب‌ها در صنعت تصفیه پساب به دلیل سطح ویژه بالا و واکنش‌پذیری شیمیایی زیاد، کاربرد گسترده‌ای دارند. این ذرات می‌توانند کارایی اکسیدکننده‌ها و مواد تمیزکننده را بهبود دهند. همچنین، غلظت بالای یون‌های منفی و رادیکال‌های آزادکه در حین فعالیت نانوحباب‌ها تولید می‌شوند، می‌توانند با ترکیبات آلی و فلزات سنگین موجود در پساب واکنش داده و آن‌ها را تجزیه کنند[۵۳].

(۱) Sanlıer

(۲) Cavalli

احمدی و *همکاران* [۵۴] در یک مطالعه نشان دادند که استفاده از هوادهی با نانوحباب در واکنش‌گرهای دسته‌ای متوالی فعال‌کننده لجن، باعث افزایش اکسیژن محلول، بهبود انتقال اکسیژن و کاهش چشمگیر تولید لجن می‌شود. این یافته‌ها برجسته کردن کاربرد نانوحباب‌ها در بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه پساب را بهتر نشان می‌دهد.

نانوحباب‌ها نقش قابل توجهی در بهبود عملکرد سیستم‌های تصفیه آب و فاضلاب ایفا می‌کنند. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که حضور نانوحباب‌ها می‌تواند انتقال اکسیژن و سایر گازها به محیط مایع را به طور چشمگیری افزایش دهد و ظرفیت اکسیداسیون آلاینده‌های آلی و فلزی را ارتقا دهد. علاوه بر این، نانوحباب‌ها با ایجاد رادیکال‌های فعال و اثرات کاتالیزوری سطحی، فرآیندهای پاک‌سازی و تجزیه مواد آلاینده را تسریع می‌کنند، بدون آنکه به افزودنی‌های شیمیایی پرهزینه یا مضر نیاز باشد. ویژگی‌های منحصربه‌فرد مانند پایداری طولانی در محیط‌های آبی و اندازه نانومقیاس، امکان نفوذ به ذرات ریز و تعامل مؤثر با آلاینده‌ها را فراهم می‌کند، که منجر به کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی سیستم‌های تصفیه می‌شود. این مزایا نانوحباب‌ها را به ابزاری نوین و پایدار برای توسعه فناوری‌های تصفیه آب و فاضلاب در مقیاس صنعتی تبدیل می‌کند [۵۵]. استفاده از نانوحباب‌های اوزون در تصفیه فاضلاب، ظرفیت اکسیداسیون آلاینده‌ها را به شکل چشمگیری افزایش می‌دهد. این نانوحباب‌ها با رهاسازی فعال اکسیژن و رادیکال‌های آزاد، واکنش‌های اکسیداسیون سریع و مؤثری را برای تجزیه ترکیبات آلی و میکروبی ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، اندازه نانومقیاس و پایداری طولانی نانوحباب‌ها، نفوذ به مناطق کم دسترس را ممکن ساخته و به کاهش مصرف انرژی و مواد شیمیایی سنتی منجر می‌شود [۵۶]. نانوحباب‌ها در حذف نانوپلاستیک‌ها از محیط‌های آبی نقش مؤثری ایفا می‌کنند. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که نانوحباب‌ها قادرند با ایجاد جریان‌های مایکروسکالی و اثرات سطحی فعال، ذرات نانوپلاستیک را به سطح مایع منتقل کنند و تمرکز آن‌ها را برای فرآیندهای بعدی حذف افزایش دهند. این مکانیزم، بهره‌وری فرآیندهای جداسازی و پاک‌سازی را به‌طور قابل توجهی ارتقا می‌دهد و می‌تواند به کاهش آلودگی‌های پلاستیکی در محیط‌های طبیعی و صنعتی کمک کند [۵۷].

کاربرد نانوحباب‌ها در تمیز کردن سطوح

نانوحباب‌ها به دلیل پایداری بالا، اندازه کوچک و سطح ویژه زیاد، در تمیز کردن سطوح کاربرد گسترده‌ای دارند. این حباب‌ها می‌توانند به راحتی در شکاف‌ها و منافذ سطوح نفوذ کنند و هنگام انفجار، انرژی آزاد کنند و جت‌های کوچکی از مایع ایجاد کنند که ذرات آلاینده را به خوبی از سطح جدا می‌کنند[۵۸]. *وو* و *همکاران* [۵۹] روشی را برای تمیز کردن سطوح با استفاده از نانوحباب‌های تولید شده به روش الکتروشیمیایی معرفی کردند. نتایج نشان داد که این روش می‌تواند به طور مؤثری آلاینده‌های سطحی را کاهش دهد و جایگزینی کارآمد برای فرآیندهای تمیز کردن مکانیکی و شیمیایی باشد.

کاهش مقاومت جریان کانالی با استفاده از نانوحباب

نانوحباب‌ها می‌توانند در سیالات یک سیستم پراکندگی پایدار تشکیل دهند که گرانروی و اصطکاک داخلی سیال را کاهش می‌دهد و مقاومت جریان را کم می‌کند. همچنین، این حباب‌ها یک لایه حفاظتی روی سطوح داخلی لوله‌ها و تجهیزات تشکیل داده و تماس سطحی جامد–مایع را کاهش می‌دهند، که مقاومت جریان را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد[۶۰]. *گائو* و *همکاران* [۶۱] با استفاده از روش خلاء، نانوحباب‌ها را در میکروکانال‌های PDMS ایجاد کردند و با استفاده از روش سرعت‌سنجی تصویر ذره‌ای (PIV)، طول لغزش سطح حباب را به صورت کمی اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که شرایط مرزی جریان روی سطح حباب از حالت بدون لغزش به لغزش تغییر کرده و این امر مقاومت جریان را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد.

کاربرد نانوحباب‌ها در فرآیند شناورسازی کف

شناورسازی کف یکی از روش‌های مهم در جداسازی مواد معدنی است که از چسبندگی و حرکت ذرات به وسیله حباب‌ها استفاده می‌کند [۶۲]. نانوحباب‌ها به دلیل سطح ویژه بالا و پایداری مناسب، می‌توانند ظرفیت جذب و چسبندگی ذرات معدنی به حباب‌ها را افزایش دهند. چن [۶۳] در مطالعه‌ای نشان داد که پیش‌تیمار با نانوحباب‌ها در شناورسازی دولومیت ریز، بازده را تا ۷٪ افزایش داده و مصرف مواد شیمیایی را تا ۲۵٪ کاهش می‌دهد. *ژانگ* و *همکاران* [۶۴] نشان دادند که استفاده از نانوحباب‌ها در شناورسازی گرافیت ریز منجر به افزایش اندازه گروه‌های آبگریز، بهبود بازیابی گرافیت‌های بسیار ریز و افزایش کارایی فرآیند شناورسازی می‌شود.

نانوحباب‌ها می‌توانند در فرآیند شناورسازی برای حذف میکروپلاستیک‌های زیر ۱۰ میکرومتر به‌طور مؤثری مورد استفاده قرار گیرند. وجود نانوحباب‌ها باعث افزایش چسبندگی ذرات ریز به سطح گاز و تسهیل جمع‌آوری آن‌ها می‌شود و در نتیجه کارایی جداسازی در فرآیندهای شناورسازی بهبود می‌یابد. این روش، رویکردی پایدار و کم‌هزینه برای مدیریت آلاینده‌های پلاستیکی در فاضلاب‌ها و محیط‌های آبی ارائه می‌دهد [۵۵].

محدودیت‌های کاربرد نانوحباب

در حوزه تصفیه آب و فاضلاب، مطالعات نشان می‌دهند که نانوحباب‌ها می‌توانند باعث افزایش بهره‌وری حذف آلاینده‌های آلی و معدنی، کاهش مصرف انرژی و کاهش تولید لجن شوند. با این حال، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرند؛ از جمله

نیاز به تجهیزات ویژه برای تولید نانوحباب‌های پایدار، حساسیت به شرایط عملیاتی مانند دما و pH ، و هزینه‌های بالای مقیاس صنعتی. بنابراین، تحلیل انتقادی نشان می‌دهد که باوجود مزایای قابل توجه، کاربرد نانوحباب‌ها در تصفیه آب هنوز با چالش‌های فنی و اقتصادی همراه است که پژوهش‌های آتی باید آن‌ها را رفع کنند.

در کاربردهای پزشکی و دارویی، نانوحباب‌ها به عنوان حامل‌های هدفمند دارو و در تصویربرداری فراصوتی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این فناوری قابلیت افزایش تحویل دارو به سلول‌های هدف و کاهش اثرات جانبی را دارد. با این حال، محدودیت‌های مشخصی نیز مطرح است؛ از جمله کنترل اندازه و پایداری نانوحباب‌ها در محیط زیستی بدن، اثرات بیولوژیکی طولانی‌مدت و نیاز به بررسی‌های ایمنی بالینی گسترده. تحلیل انتقادی این بخش نشان می‌دهد که اگرچه پتانسیل بالایی برای کاربردهای بالینی وجود دارد، تحقق این قابلیت‌ها مستلزم توسعه روش‌های کنترل دقیق و استانداردسازی تولید نانوحباب‌ها است.

در بخش مهار خوردگی فلزات، نانوحباب‌ها با ایجاد لایه‌ای حفاظتی و تسریع تشکیل رسوبات معدنی می‌توانند نرخ خوردگی را در محیط‌های خورنده کاهش دهند. تحلیل انتقادی نشان می‌دهد که این مکانیسم‌ها در آزمایش‌های کنترل‌شده اثربخش هستند، اما عملکرد آن‌ها در شرایط صنعتی واقعی و در بلندمدت نیازمند تحقیقات بیشتر است. چالش‌هایی مانند توزیع یکنواخت نانوحباب‌ها در سیستم‌های بزرگ، پایداری در شرایط جریان‌های شدید و ترکیب با سایر افزودنی‌ها از جمله موضوعاتی هستند که برای بهره‌برداری صنعتی باید بررسی شوند.

ر کاربرد نانوحباب‌ها برای کاهش مقاومت جریان در کانال‌ها، مطالعات نشان داده‌اند که وجود لایه‌های گازی ریز بر سطح سیالات می‌تواند منجر به کاهش اصطکاک و افزایش بازده انتقال انرژی شود. با این حال، تحلیل انتقادی مشخص می‌کند که این اثر عمدتاً در مقیاس آزمایشگاهی و کانال‌های کوچک اثبات شده و در سیستم‌های صنعتی بزرگ با جریان‌های پیچیده، اثرات توزیع ناهمگون نانوحباب‌ها، پایداری محدود و تغییرات دما و فشار می‌تواند موجب کاهش کارایی شود. بنابراین، بهره‌برداری عملی نیازمند توسعه روش‌های توزیع یکنواخت و پایدار نانوحباب‌ها در سیستم‌های بزرگ است.

در بهبود فرآیند شناورسازی مواد معدنی، نانوحباب‌ها با افزایش سطح تماس گاز و ذرات، باعث بهبود بازیابی مواد ارزشمند می‌شوند. تحلیل انتقادی نشان می‌دهد که در حالی که این فناوری پتانسیل افزایش بازده فرآیند را دارد، محدودیت‌هایی شامل هزینه‌های بالای تولید نانوحباب، حساسیت به pH و ترکیب شیمیایی محلول، و نیاز به بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی برای هر ماده معدنی خاص، چالش‌های مهمی در مقیاس صنعتی ایجاد می‌کند.

در زمینه تصفیه نانوبلاستیک‌ها، نانوحباب‌ها می‌توانند با فراهم کردن اکسیژن فعال و تحریک واکنش‌های اکسیداتیو، حذف ذرات ریز پلاستیکی را تسهیل کنند. تحلیل انتقادی نشان می‌دهد که هنوز تحقیقات محدودی در مقیاس صنعتی انجام شده و تأثیر ترکیب با سایر آلاینده‌ها، میزان بار آلاینده و ویژگی‌های شیمیایی آب بر کارایی این روش به‌طور کامل مشخص نشده است. بنابراین، این کاربرد باوجود پتانسیل بالای محیط‌زیستی، هنوز در مرحله تحقیقاتی و آزمایشگاهی باقی مانده است.

در کاربردهای کشاورزی و آبیاری با نانوحباب‌ها، افزایش حلالیت اکسیژن و بهبود تنفس ریشه‌ها موجب افزایش رشد و عملکرد گیاهان شده است. با این حال، نقد انتقادی نشان می‌دهد که اثرات بلندمدت بر خاک و میکروارگانیسم‌های محیط، مصرف انرژی تجهیزات تولید نانوحباب، و هزینه‌های عملیاتی هنوز به‌طور جامع ارزیابی نشده و ممکن است محدودیت‌هایی برای استفاده گسترده در کشاورزی ایجاد کند.

بررسی اثر نانوحباب‌ها بر ممانعت از خوردگی فولاد در محیط‌های زمین گرمایی اسیدی: نمونه موردی

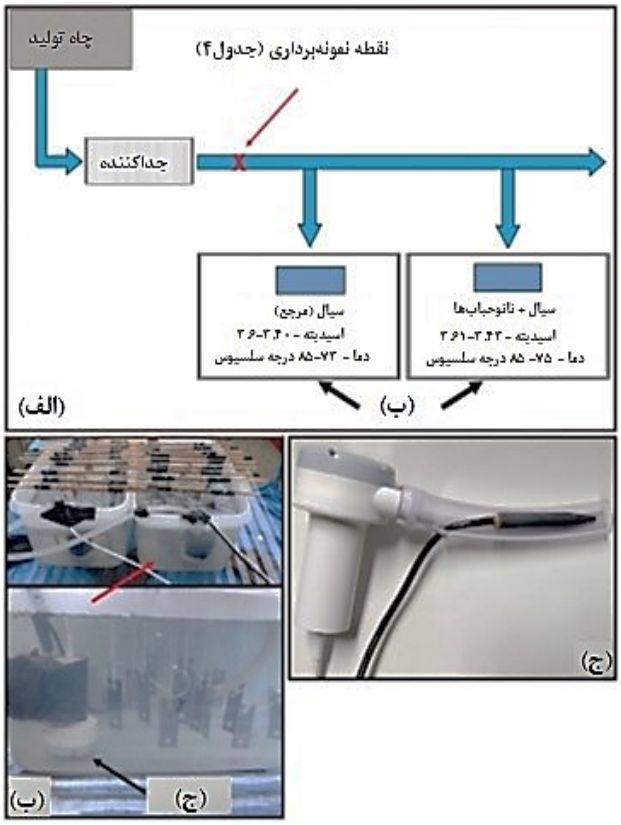
هدف این مطالعه، بررسی توانایی نانوحباب‌ها در کاهش نرخ خوردگی فولاد کم‌کربن در محیط اسیدی زمین گرمایی با دمای بالا است. برخلاف روش‌های شیمیایی متداول مانند تنظیم pH، در این پژوهش از یک روش فیزیکی، یعنی تزریق نانوحباب‌های پایدار به مایع زمین گرمایی، استفاده شد تا اثربخشی آن در کاهش خوردگی ارزیابی شود (شکل ۱۹). آزمایش‌ها در نیروگاه زمین گرمایی Hatchobaru ژاپن با استفاده از مایع اسیدی خروجی از جداکننده انجام گرفت (جدول ۶)[۶۵]. این مایع دارای pH حدود ۳٫۵، دمای ۷۵–۸۵ درجه و غلظت بالای سیلیس mg/L ۸۶۰ بود. دو محیط آزمایشی شامل:

- مایع زمین گرمایی مرجع بدون نانوحباب
- مایع زمین گرمایی با تزریق مداوم نانوحباب‌های هوایی به‌مدت ۷ روز

نانوحباب‌ها توسط دستگاهی با نازل سرامیکی ریزمنافذ تولید شدند (قطر متوسط ۸۵ نانومتر، غلظت ۳×۱۰^{۹} حباب در میلی‌لیتر). نمونه‌ها از فولاد کم‌کربن نوع SPCC مطابق استاندارد JIS تهیه شدند (C≤0.15%, Mn≤0.10%, P≤0.10%). ابعاد هر کوپن ۵۰×۲۰×۱٫۱ میلی‌متر بود. نمونه‌ها در دو مخزن پلی‌پروپیلن در مایع قرار گرفتند و در فواصل زمانی مختلف (۲۴ تا ۱۶۸ ساعت) از محیط خارج و تحت وزن‌سنجی، شست‌وشو و آنالیز قرار گرفتند. میزان مهار خوردگی η(t) بر اساس تفاوت کاهش وزن نمونه‌ها در محیط مرجع و محیط حاوی نانوحباب در زمان t محاسبه شد. همچنین نرخ خوردگی با فرمول مشخصی بر حسب میلی‌متر در سال استخراج شد[۶۵].

جدول ۶ - ترکیب شیمیایی (میلی‌گرم بر لیتر) و هدایت الکتریکی (E.C.؛ میلی‌زیمنس بر متر) سیال زمین گرمایی مورد مطالعه. نقطه نمونه‌برداری در شکل ۱۹ الف نشان داده شده است [۶۵]

سدیم	پتاسیم	کلسیم	منیزیم	کلر	سولفات	هیدروژن کربنات	آهن	فلوئور	اکسید سیلیس	هدایت الکتریکی
۱۰۹۰	۱۹۸	۸,۰	۳۶۰	۱۶۴۰	۴۸۹	کمتر از یک	۴۰۲۷	۴,۳	۸۵۵	۶۱۷



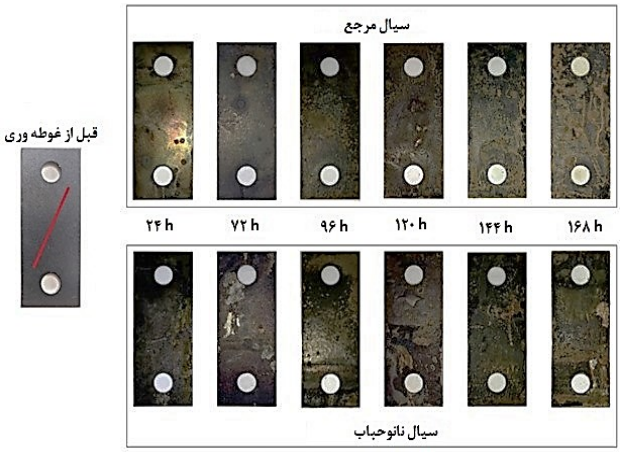
شکل ۱۹ - (الف) نمای شماتیک از آزمایش‌های خوردگی غوطه‌وری و نقطه نمونه‌برداری برای بررسی ویژگی‌های شیمیایی سیال که در جدول ۴ فهرست شده‌اند. (ب) تصاویر مربوط به آزمایش‌های خوردگی غوطه‌وری. (ج) مولد نانوحباب از نوع نازل سرامیکی که در این مطالعه استفاده شده است [۶۵]

بازرسی بصری و کاهش وزن نمونه‌ها

پس از ۲۴ ساعت، تغییراتی مانند خوردگی سطحی و حباب‌های اکسیژنی (تا قطر ۶ میلی‌متر) مشاهده شد. پس از ۱۶۸ ساعت، خوردگی وسیع و تغییر رنگ شدید (قهوه‌ای-قرمز) رخ داد. در کل، تفاوت ظاهری عمده‌ای بین دو گروه دیده نشد، اما کاهش وزن نمونه‌ها متفاوت بود (شکل ۲۰):

- گروه مرجع: کاهش وزن بین ۲۲۶ تا ۹۴۶ میلی‌گرم، میانگین ۱۶۶ میلی‌گرم در روز
- گروه نانوحباب: کاهش وزن بین ۱۷۱ تا ۸۱۰ میلی‌گرم، میانگین ۱۳۲ میلی‌گرم در روز

نرخ مهار خوردگی برای برخی زمان‌ها تا ۵۲٪ نیز رسید. تنها در زمان ۹۶ ساعت، نمونه نانوحباب‌دار کاهش وزن بیشتری داشت [۶۵].



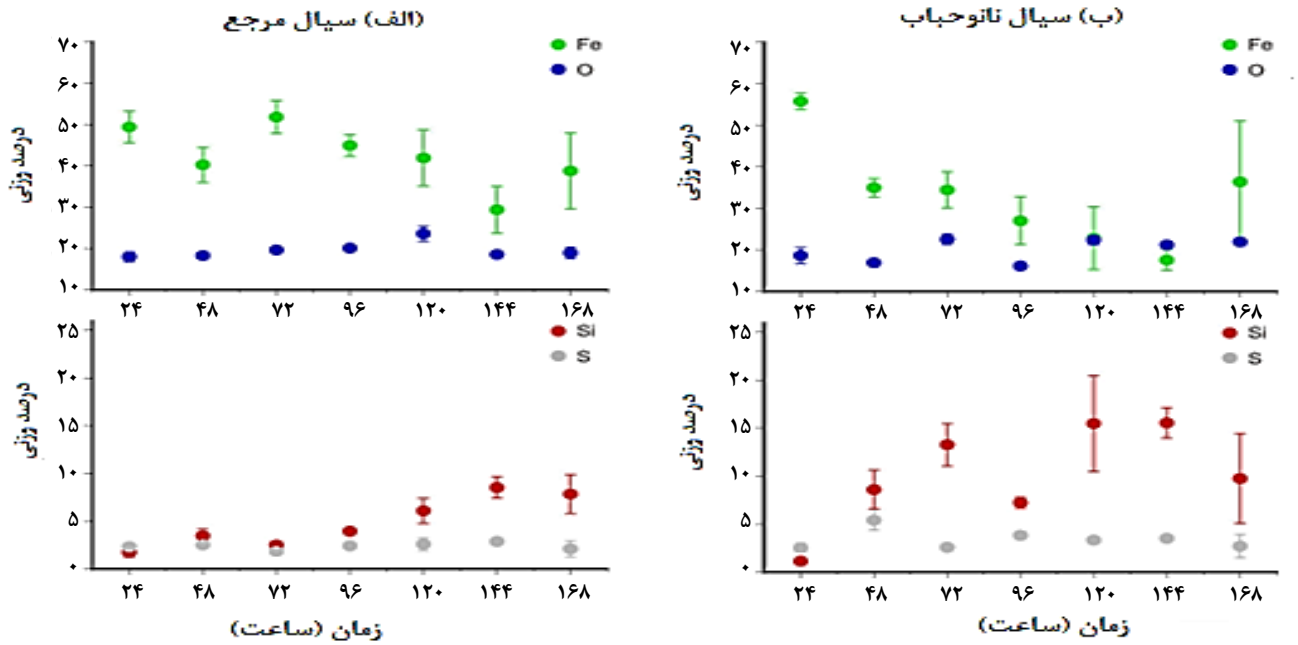
شکل ۲۰ - تصاویر کوپن‌ها مربوط به سیال مرجع و سیال حاوی نانوحباب هوا پس از ۲۴، ۷۲، ۹۶، ۱۲۰، ۱۴۴ و ۱۶۸ ساعت آزمایش غوطه‌وری. خط قرمز موجود در تصویر کوپن پیش از انجام آزمایش غوطه‌وری (سمت چپ) موقعیت اسکن برای تحلیل EDX را نشان می‌دهد [۶۵]

تحلیل سطحی (SEM و EDX)

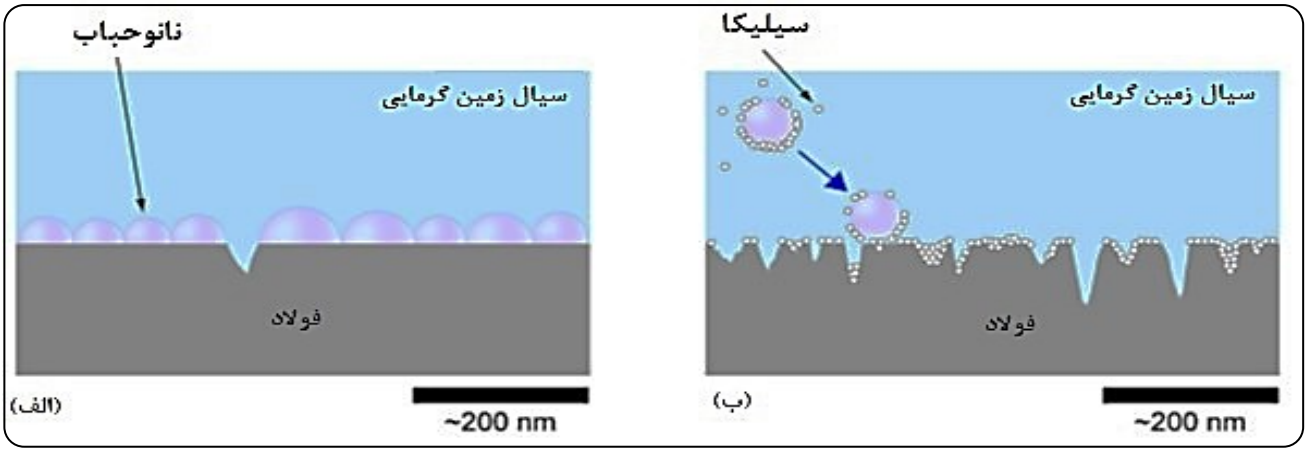
تصاویر SEM نشان داد که خوردگی سطحی از ۲۴ ساعت شروع می‌شود اما شدت آن در گروه نانوحبابی کمتر بود. آنالیز EDX نیز حاکی از کاهش غلظت آهن و افزایش غلظت سیلیس در نمونه‌های حاوی نانوحباب بود. این موضوع نشان می‌دهد که احتمالاً لایه‌ای از اکسید یا سیلیس روی سطح تشکیل شده که مانع خوردگی شده است.

مکانیسم‌های مؤثر در کاهش خوردگی

- نانوحباب‌ها با چسبندگی بیشتر به سطوح زبر و خاصیت پایدار در دماهای بالا، طول لغزش هیدرودینامیکی را افزایش می‌دهند. این ویژگی باعث کاهش اصطکاک بین مایع و سطح فولاد می‌شود. با افزایش تراکم نانوحباب‌ها روی سطح، آن‌ها همانند یک پوشش نانویی عمل کرده و از تماس مستقیم مایع اسیدی با فولاد جلوگیری می‌کنند. این لایه می‌تواند از شروع خوردگی در محل‌های حساس مانند مرز دانه‌ها جلوگیری کند [۶۸-۶۶]
- غلظت بالای سیلیس در مایع زمین گرمایی احتمال تشکیل لایه‌های محافظتی سیلیسی را افزایش می‌دهد. مطالعات نشان داده‌اند که در pH پایین، سیلیس به‌صورت یون‌های منفی در محلول وجود دارد و نانوحباب‌ها با بار مثبت می‌توانند به جذب آن کمک کنند[۶۹، ۷۰]. این پدیده باعث تسریع در رسوب‌گذاری سیلیس روی سطح فولاد و ایجاد یک لایه محافظتی می‌شود. آنالیزهای EDX نیز نشان دادند که غلظت سیلیس در سطح نمونه‌های حاوی نانوحباب بیشتر است،



شکل ۲۱ – ترکیب شیمیایی سطح کوپن‌های غوطه‌ور شده (بر حسب درصد وزنی) که با استفاده از EDX تحلیل شده‌اند. (الف) کوپن‌های غوطه‌ور شده در سیال مرجع (ب) کوپن‌های غوطه‌ور شده در سیال حاوی نانوحباب هوا مقادیر عناصرFe ، O، Si وS در کوپن‌ها پیش از انجام آزمایش غوطه‌وری که با EDX اندازه‌گیری شده‌اند، به‌ترتیب برابر بودند با: ۰/۸ ± ۹۲/۷، ۰/۰۷ ± ۱/۷۳، ۰/۰ و ۰/۰۴ ± ۰/۱۲ درصد وزنی [۶۵]



شکل ۲۲ – نمای شماتیک از مکانیزم مهار خوردگی توسط نانوحباب‌ها .(الف) لایه‌ای از حباب‌ها به‌صورت لایه مانند (ب) رسوب‌گذاری سیلیس [۶۵]

به‌ویژه پس از ۴۸ ساعت. این موضوع نقش نانوحباب‌ها در تشکیل این لایه را تأیید می‌کند. جالب اینکه نمونه ۹۶ ساعته که اثر مهار خوردگی ضعیفی داشت، غلظت سیلیس سطحی پایینی نیز داشت، که نشان‌دهنده وابستگی عملکرد به شکل‌گیری این لایه است (شکل ۲۱ و ۲۲).

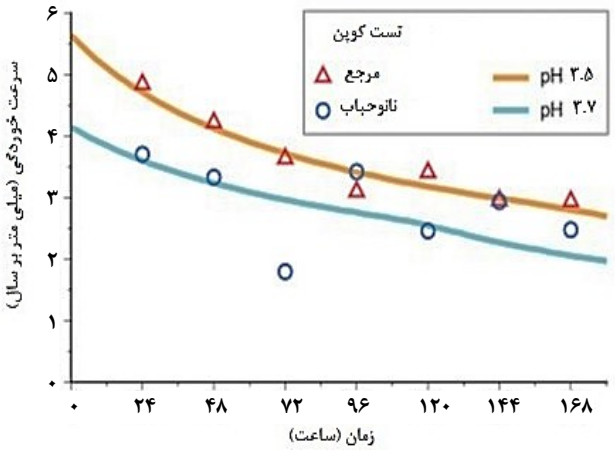
- برخلاف تصور اولیه، تزریق نانوحباب‌های هوایی نه تنها خوردگی را تشدید نکرد، بلکه با افزایش اکسیژن محلول (تا ۲۰۰٪)، امکان تشکیل لایه‌های محافظتی از اکسید آهن پایدار مانند هماتیت (Fe_2O_3) فراهم شد. این فاز اکسیدی می‌تواند از تبدیل محافظت‌کننده منیتیت به فازهای غیرمحافظ جلوگیری کند و موجب کاهش خوردگی شود [۷۱].

مقایسه با روش‌های شیمیایی

در این بخش، کارایی نانوحباب‌ها با روش تنظیم pH (روش متداول برای کاهش خوردگی) مقایسه شد. نتایج نشان دادند که:

- نرخ خوردگی نمونه‌های مرجع از ۴/۹۳ تا ۲/۹۷ mm/y کاهش یافت.
- نرخ خوردگی نمونه‌های حاوی نانوحباب از ۳/۷۶ تا ۱/۷۸ mm/y کاهش یافت.

با استفاده از مدل‌های عددی و روابط تجربی، معادل‌سازی انجام شد و مشخص شد که تزریق نانوحباب‌ها معادل افزایش pH محیط از ۳/۵ به ۳/۹–۴/۰ عمل کرده است، بدون آنکه نیازی به مواد شیمیایی باشد. درمجموع این مطالعه برای اولین‌بار اثبات کرد که نانوحباب‌های هوایی می‌توانند در محیط‌های زمین گرمایی اسیدی،



شکل ۲۳ - نرخ‌های خوردگی کوپن‌های غوطه‌ور شده در سیال مرجع (مثلث‌های قرمز) و سیال حاوی نانوحباب (دایره‌های آبی) به همراه نرخ‌های خوردگی مدل‌سازی‌شده در pH برابر ۳/۵ (خط نارنجی) و ۳/۷ (خط فیروزه‌ای) [۶۵]

نرخ خوردگی فولاد را کاهش دهند. این اثر از چند مسیر زیر حاصل می‌شود:

۱- ایجاد لایه حبابی روی سطح فولاد و کاهش تماس با مایع اسیدی

۲- تسریع در رسوب سیلیس و تشکیل لایه محافظ

۳- مساعدت به تشکیل لایه‌های پایدار اکسید آهن مانند هماتیت(Fe_2O_3)

۴- کاهش اصطکاک جریان و افزایش طول لغزش هیدرودینامیکی [۷۲]

کاربرد نانوحباب‌ها به‌عنوان یک راهکار ساده، پایدار، بی‌ضرر و بدون تغییر شیمی مایع، می‌تواند به‌عنوان جایگزین روش‌های پرهزینه شیمیایی در مهار خوردگی در صنایع زمین گرمایی و دیگر صنایع مرتبط مطرح شود.

بررسی اثر نانوحباب‌های هوا بر مهار خوردگی برنج در سامانه‌های گردش آب خنک‌کننده

مطالعه *ژانگ* و *همکاران* به‌صورت جامع مکانیزم‌های مهار خوردگی برنج در حضور نانوحباب‌های هوا را در سامانه‌های گردش آب خنک‌کننده مورد بررسی قرار داده است. خوردگی فلزات در مدارهای خنک‌کننده صنعتی یکی از عوامل اصلی کاهش عمر تجهیزات و افزایش هزینه‌های نگهداری محسوب می‌شود. روش‌های مرسوم مقابله با خوردگی، عمدتاً متکی بر افزودنی‌های شیمیایی مهارکننده هستند که هزینه‌بر و گاه زیان‌آور برای محیط زیست می‌باشند[۷۳]. نانوحباب‌ها به دلیل اندازه نانومتری، سطح ویژه زیاد و انرژی سطحی بالا، توانایی بالایی در تعامل با سطح فلزات و محیط خورنده دارند و می‌توانند جایگزینی سبز و کارآمد برای مهارکننده‌های سنتی باشند [۷۴].

در این پژوهش، نانوحباب‌های هوا به آب در گردش تزریق شدند و نرخ خوردگی برنج تحت شرایط کنترل‌شده ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که حضور نانوحباب‌ها باعث کاهش قابل توجه نرخ خوردگی می‌شود. تحلیل‌ها نشان داد که این اثر حفاظتی از دو مکانیسم اصلی ناشی می‌شود:

۱- تشکیل لایه محافظ سطحی: نانوحباب‌ها با ایجاد شرایط مناسب در سطح فلز، باعث تشکیل لایه‌ای غنی از اکسید برنج و یکنواخت می‌شوند. این لایه به‌عنوان مانع فیزیکی و شیمیایی عمل کرده و تماس مستقیم یون‌های خورنده با سطح فلز را محدود می‌کند.

۲- بهبود انتقال اکسیژن و تولید رادیکال‌های فعال: نانوحباب‌ها با آزادسازی تدریجی اکسیژن محلول و تولید رادیکال‌های هیدروکسیل، موجب اکسیداسیون کنترل‌شده سطح می‌شوند. این فرآیند به تثبیت لایه محافظ و کاهش نرخ خوردگی کمک می‌کند.

مقایسه اثر نانوحباب‌ها با میکروحباب‌ها نشان داد که کاهش نرخ خوردگی در حضور نانوحباب‌ها به‌طور چشمگیری بیشتر است. این تفاوت ناشی از اندازه کوچک نانوحباب‌ها، انرژی سطحی بالاتر و توانایی نفوذ به میکروحفره‌های سطح فلز است. علاوه بر این، پایش درازمدت سیستم نشان داد که نانوحباب‌ها پایداری لایه محافظ را حتی در چرخه‌های کاری متوالی حفظ می‌کنند، که این ویژگی، استفاده از نانوحباب‌ها را در محیط‌های صنعتی بسیار جذاب می‌سازد[۷۴].

از منظر روش‌شناسی، مطالعه *ژانگ* و *همکاران* از ترکیبی از تکنیک‌های الکتروشیمیایی، طیف‌سنجی سطح و آزمایش‌های پایش در گردش آب استفاده کرده است. این رویکرد چندجانبه امکان تشخیص دقیق تغییرات شیمیایی و فیزیکی سطح فلز و همچنین ارتباط آن با حضور نانوحباب‌ها را فراهم کرده است. نتایج نشان داد که افزایش غلظت نانوحباب‌ها و کنترل اندازه و توزیع آن‌ها، اثر حفاظتی را به‌طور محسوسی افزایش می‌دهد [۷۴].

مقایسه یافته‌های این مطالعه با سایر تحقیقات مشابه نشان می‌دهد که نانوحباب‌ها در مهار خوردگی فلزات در محیط‌های آبی، هم در صنایع نیروگاهی و هم در صنایع فرآیندی پتروشیمی، دارای پتانسیل بالایی هستند[۷۵]. مطالعات پیشین عمدتاً بر میکروحباب‌ها یا افزودنی‌های شیمیایی تمرکز داشته‌اند و شواهد تجربی مستقیمی از عملکرد نانوحباب‌ها در سامانه‌های صنعتی ارائه نکرده‌اند. یافته‌های ژانگ با ارائه مکانیزم‌های تفصیلی و داده‌های پایش در طول زمان، شکاف مهمی در این زمینه پر کرده و امکان طراحی سیستم‌های پایدار و سبز برای کاهش خوردگی را فراهم می‌آورد.

در نهایت، این مطالعه نشان می‌دهد که نانوحباب‌های هوا می‌توانند به‌عنوان ابزار مهار خوردگی با مزایای زیر مورد توجه قرار گیرند: [۷۴]

- کاهش نرخ خوردگی بدون نیاز به افزودنی‌های شیمیایی خطرناک
- افزایش پایداری لایه محافظ و کاهش هزینه‌های نگهداری تجهیزات
- قابلیت اعمال در چرخه‌های طولانی و شرایط عملیاتی صنعتی
- اثرگذاری همزمان بر کیفیت آب و حفاظت از فلزات

با توجه به نتایج به‌دست آمده، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده بر بهینه‌سازی تولید نانوحباب‌ها، کنترل اندازه و توزیع آن‌ها و ارزیابی

عملکرد در مقیاس صنعتی متمرکز شود. این اقدامات می‌تواند زمینه استفاده گسترده نانوحباب‌ها در صنایع انرژی، نیروگاهی و فرآیندی را فراهم کرده و جایگزینی پایدار برای مهارکننده‌های سنتی فراهم کند.

استفاده از نانوحباب‌ها برای مهار خوردگی مس تحت شرایط جریان جت مایع

در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۳ توسط *کاتاگیری* و *همکاران* منتشر شد، استفاده از نانوحباب‌ها برای مهار خوردگی مس تحت شرایط جریان جت مایع بررسی شد .در این تحقیق، اثر نانوحباب‌های هوا در مهار خوردگی مس در محیطی با جریان جت مایع با سرعت‌های مختلف و در حضور محلول $CuCl_2$ ٪۰٫۲۵ در دمای ۴۰ درجه سلسیوس مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن نانوحباب‌ها به این محیط می‌تواند نرخ خوردگی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. به‌ویژه، در سرعت‌های بالاتر جریان جت و زمان‌های آزمایش طولانی‌تر، میزان مهار خوردگی به ٪۴۳٫۹ بر اساس کاهش وزن و ٪۶۹٫۵ بر اساس عمق فرسایش رسید. محققان با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و اندازه‌گیری‌های عمق فرسایش، نشان دادند که نانوحباب‌ها با ایجاد یک لایه محافظ بر روی سطح مس، از تماس مستقیم فلز با محیط خورنده جلوگیری می‌کنند. این لایه محافظ می‌تواند به کاهش تنش برشی دیواره و در نتیجه کاهش نرخ خوردگی کمک کند. این یافته‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالای نانوحباب‌ها به‌عنوان یک راهکار مؤثر و پایدار در مهار خوردگی فلزات در محیط‌های صنعتی با جریان‌های شدید هستند [۷۶].

نانوحباب‌ها به‌عنوان ساختارهای گازی نانومقیاس، به دلیل پایداری بالا و سطح ویژه گسترده، توانایی منحصربه‌فردی در مهار خوردگی فلزات در محیط‌های خورنده نشان می‌دهند. مکانیسم عملکرد آن‌ها را می‌توان به دو جنبه اصلی فیزیکی و شیمیایی تفکیک کرد. از منظر فیزیکی، نانوحباب‌ها با تشکیل یک لایه متراکم و یکنواخت بر روی سطح فلز، تماس مستقیم یون‌های خورنده مانند Cl^- و H^+ با سطح فلز را محدود می‌کنند. این "بالشتک حبابی" موجب کاهش نفوذ یون‌های خورنده به سطح و در نتیجه کاهش نرخ خوردگی می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که ضخامت و چگالی این لایه نقش مهمی در میزان حفاظت دارد؛ هرچه توزیع حباب‌ها یکنواخت‌تر و غلظت آن‌ها بالاتر باشد، اثر محافظتی بیشتر است.

جنبه شیمیایی این مکانیسم شامل تسریع فرآیند رسوب‌گذاری ترکیبات معدنی مانند سیلیکا و اکسیدهای فلزی روی سطح فلز است. حضور نانوحباب‌ها موجب افزایش نرخ تجمع این رسوبات می‌شود و یک سد شیمیایی مقاوم بر سطح فلز ایجاد می‌کند که علاوه بر جلوگیری از تماس یون‌های خورنده، با اصلاح محیط سطحی، انرژی سطحی و پتانسیل الکتروشیمیایی، نقش محافظت‌کننده ثانویه را ایفا می‌کند. شواهد تجربی این عملکرد از طریق آزمایش‌های الکتروشیمیایی مانند EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy) و PDP (Potentiodynamic Polarization) به‌دست آمده است، که نشان می‌دهد مقاومت سطحی فلز در حضور نانوحباب‌ها افزایش یافته و جریان خوردگی کاهش می‌یابد.

مطالعات میکروسکوپی و طیف‌سنجی نیز این مکانیسم را تأیید می‌کنند. بررسی سطح فلز با SEM (Scanning Electron Microscopy) نشان می‌دهد که حباب‌ها به‌صورت یکنواخت روی سطح فلز توزیع شده و لایه رسوبی محافظ را تثبیت می‌کنند. همچنین داده‌های XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) بیانگر تشکیل ترکیبات معدنی پایدار بر سطح فلز در حضور نانوحباب‌ها است. این ترکیب عملکرد فیزیکی و شیمیایی باعث می‌شود که نانوحباب‌ها نه تنها به‌صورت موقت، بلکه با پایداری نسبی، نرخ خوردگی را در محیط‌های اسیدی و آب‌های خنک‌کننده صنعتی کاهش دهند.

با توجه به این مکانیسم‌ها، استفاده از نانوحباب‌ها در صنایع انرژی، به‌ویژه در سیستم‌های زمین گرمایی و نیروگاه‌های حرارتی، مزایای قابل توجهی دارد. کاهش خوردگی موجب افزایش عمر مفید تجهیزات، کاهش هزینه‌های نگهداری و ارتقای بهره‌وری سیستم‌ها می‌شود. با این حال، چالش‌هایی همچون کنترل اندازه و توزیع یکنواخت نانوحباب‌ها در مقیاس صنعتی، پایداری طولانی‌مدت لایه محافظ و تأثیر شرایط عملیاتی (مانند دما، فشار و ترکیب شیمیایی سیال) نیازمند تحقیقات بیشتر است. بنابراین، مطالعات آتی باید به مدل‌سازی دقیق مکانیزم‌های فیزیکی و شیمیایی، بهینه‌سازی تولید نانوحباب‌ها و ارزیابی عملکرد آن‌ها در شرایط واقعی عملیاتی بپردازند تا این فناوری به‌صورت پایدار و صنعتی قابل بهره‌برداری باشد.

به‌منظور ارائه دیدی مقایسه‌ای نسبت به کارایی نانوحباب‌ها در مهار خوردگی، جدول ۷ مزایا و محدودیت‌های این فناوری نوین را در کنار روش‌های سنتی بازدارنده نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

بررسی‌های انجام‌شده در این مقاله مروری نشان می‌دهد که نانوحباب‌ها به‌عنوان ساختارهایی پایدار و کارآمد در مقیاس نانو، ظرفیت‌های گسترده‌ای در حوزه‌های صنعتی، زیست‌محیطی و پزشکی دارند. ویژگی‌هایی نظیر سطح ویژه زیاد، رفتار فیزیکوشیمیایی منحصربه‌فرد و قابلیت کنترل اندازه، آن‌ها را به ابزاری نوین برای بهبود فرآیندهای پیچیده تبدیل کرده است. در صنایع نیروگاهی، مطالعات متعددی اثبات کرده‌اند که استفاده از نانوحباب‌ها می‌تواند نرخ خوردگی فلزات در محیط‌های شدیداً خورنده را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. این عملکرد عمدتاً به دو مکانیسم نسبت داده می‌شود: ایجاد لایه‌ای حفاظتی از حباب‌ها بر سطح فلز و تسریع تشکیل رسوبات معدنی مانند سیلیکا که نقش یک سد مقاوم را ایفا می‌کنند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای صنعتی نانوحباب‌ها، مهار خوردگی فلزات

جدول ۷ – مقایسه اثرات نانوحباب‌ها و روش‌های سنتی مهار خوردگی [۷۷-۷۹]

روش مهار خوردگی	اثر بازدارندگی	محدودیت‌ها	اثر زیست‌محیطی	هزینه/پیچیدگی
پوشش‌های شیمیایی	متوسط تا بالا	ناپایدار در دما/فشار بالا	گاهی مضر	متوسط تا بالا
مهارکننده‌های شیمیایی	بالا (کوتاه‌مدت)	نیاز به تزریق مداوم	ممکن است سمی باشد	متوسط
تغییر pH	متوسط	نیازمند کنترل دقیق	کم	متوسط
آلیاژ مقاوم	بالا	هزینه بالا، تغییر خواص مکانیکی	کم	بالا
نانوحباب‌ها	بالا (طبیعی و پایدار)	بهینه‌سازی روش تولید و تراکم لازم است	کم، دوستدار محیط	متوسط، قابل ترکیب با سیستم‌های موجود

در سامانه‌های گردش آب و محیط‌های خورنده است. عملکرد حفاظتی آن‌ها عمدتاً از طریق تشکیل لایه‌ای یکنواخت و محافظ از حباب‌ها روی سطح فلز و تسریع واکنش‌های اکسیداسیون کنترل‌شده رخ می‌دهد. این اثر حفاظتی در مقایسه با روش‌های سنتی و میکروحباب‌ها پایداری و کارایی بالاتری دارد و می‌تواند در چرخه‌های کاری طولانی، دوام زیرساخت‌های فلزی را افزایش دهد. افزون بر حوزه خوردگی، گزارش‌های علمی نشان داده‌اند که نانوحباب‌ها در تصفیه آب، حذف آلاینده‌های آلی و فلزی، بهبود فرایند شناورسازی مواد معدنی، افزایش بازده کشاورزی و حتی در کاربردهای پزشکی مانند انتقال دارو و ضدعفونی، نتایج قابل توجهی به همراه داشته‌اند.

این گستره کاربردی، جایگاه نانوحباب‌ها را به‌عنوان یک فناوری میان‌رشته‌ای و پایدار بیش از پیش تقویت می‌کند. با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌هایی همچون بهینه‌سازی روش‌های تولید، افزایش پایداری و یکنواختی نانوحباب‌ها، و ارزیابی عملکرد آن‌ها در مقیاس صنعتی و شرایط عملیاتی بلندمدت همچنان باقی است. آینده این حوزه به تحقیقات نظام‌مند برای رفع این محدودیت‌ها و توسعه سامانه‌های صنعتی مقیاس‌پذیر وابسته است. در صورت تحقق این اهداف، نانوحباب‌ها می‌توانند به‌عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی در افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌های نگهداری و حرکت به‌سوی توسعه پایدار در صنایع مختلف شناخته شوند.

مراجع

[1] Chu P., Finch J., Bournival G., Ata S., Hamlett C., Pugh R.J., A Review of Bubble Break-Up, *Advances in colloid and interface science,* **270**: 108-122 (2019).

[2] Minmin Z., RT S.J., Nanobubble–Nanoparticle Interactions in Bulk Solutions, *Langmuir,* **32(43)**: 11280-11286 (2016).

[3] Alheshibri M., Al Baroot A., Shui L., Zhang M., Nanobubbles and Nanoparticles, *Current Opinion in Colloid & Interface Science,* **55**: 101470 (2021).

[4] Helfield B., Zou Y., Matsuura N., Acoustically-Stimulated Nanobubbles: Opportunities in Medical Ultrasound Imaging and Therapy, *Frontiers in Physics,* **9**: 654374 (2021).

[5] Marcelino K.R., Ling L., Wongkiew S., Nhan H.T., Surendra K., Shitanaka T., Lu H., Khanal S.K., Nanobubble Technology Applications in Environmental and Agricultural Systems: Opportunities and Challenges, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology,* **53**: 1378-1403 (2023).

[6] Zhou L., Wang X., Hyun-Joon S., Zhang L., Hu J., Surface Nanobubbles Produced by Cold Water Investigated Using Scanning Transmission X-Ray Microscopy, *Microscopy and Microanalysis,* **24**: 470-471 (2018).

[7] Michailidi E.D., Bomis G., Varoutoglou A., Kyzas G.Z., Mitrikas G., Mitropoulos A.C., Efthimiadou E.K., Favvas E.P., Bulk Nanobubbles: Production and Investigation of Their Formation/Stability Mechanism, *Journal of colloid and interface science,* **564**: 371-380 (2020).

[8] Nogara J., Zarrouk S.J., Corrosion in Geothermal Environment: Part 1: Fluids and Their Impact, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* **82**: 1333-1346 (2018).

[9] Nogara J., Zarrouk S.J., Corrosion in Geothermal Environment Part 2: Metals and Alloys, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* **82**: 1347-1363 (2018).

[10] Tang Z., A Review of Corrosion Inhibitors for Rust Preventative Fluids, *Current Opinion in Solid State and Materials Science,* **23**: 100759 (2019).

[11] Du Toit L.C., Govender T., Pillay V., Choonara Y.E., Kodama T., Investigating the Effect of Polymeric Approaches on Circulation Time and Physical Properties of Nanobubbles, *Pharmaceutical research,* **28**: 494-504 (2011).

[12] Li D., Zhao X., Contact angle of surface nanobubbles, *J. Heilongjiang Univ. Sci. Technol,* 27: (2017).

[13] Lohse D., Zhang X., Pinning and Gas Oversaturation Imply Stable Single Surface Nanobubbles, *Physical Review E,* **91**: 031003 (2015).

[14] Ma X., Li M., Xu X., Sun C., On the Role of Surface Charge and Surface Tension Tuned by Surfactant in Stabilizing Bulk Nanobubbles, *Applied Surface Science,* **608**: 155232 (2023).

[15] Meegoda J.N., Aluthgun Hewage S., Batagoda J.H., Stability of Nanobubbles, *Environmental Engineering Science,* **35(11)**: 1216-1227 (2018).

[16] Zhou L., Wang S., Zhang L., Hu J., Generation and Stability of Bulk Nanobubbles: A Review and Perspective, *Current Opinion in Colloid & Interface Science,* **53**: 101439 (2021).

[17] Zhang X., Lhuissier H., Sun C., Lohse D., Surface Nanobubbles Nucleate Microdroplets, *Physical review letters,* **112**: 144503 (2014).

[18] Zhang R., Gao Y., Chen L., Ge G., Controllable Preparation of Monodisperse Nanobubbles by Membrane Sieving, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,* **642**: 128656 (2022).

[19] Senthilkumar G., Purusothaman M., Rameshkumar C., Joy N., Sachin S., Thanigai K.S., Generation and Characterization of Nanobubbles for Heat Transfer Applications, *Materials Today: Proceedings,* **43**: 3391-3393 (2021).

[20] Etchepare R., Oliveira H., Nicknig M., Azevedo A., Rubio J., Nanobubbles: Generation Using a Multiphase Pump, Properties and Features in Flotation, *Minerals Engineering,* **112**: 19-26 (2017).

[21] Jadhav A.J., Ferraro G., Barigou M., Generation of Bulk Nanobubbles Using a High-Shear Rotor–Stator Device, *Industrial & Engineering Chemistry Research,* **60**: 8597-8606 (2021).

[22] Ulatowski K., Sobieszuk P., Influence of Liquid Flowrate on Size of Nanobubbles Generated by Porous-Membrane Modules, *Chemical and Process Engineering,* 335-345 (2018).

[23] Kukizaki M., Goto M., Size Control of Nanobubbles Generated from Shirasu-Porous-Glass (SPG) Membranes, *Journal of membrane science,* **281**: 386-396 (2006).

[24] Ahmed A.K.A., Sun C., Hua L., Zhang Z., Zhang Y., Zhang W., Marhaba T., Generation of Nanobubbles by Ceramic Membrane Filters: The Dependence of Bubble Size and Zeta Potential on Surface Coating, Pore Size and Injected Gas Pressure, *Chemosphere,* **203**: 327-335 (2018).

[25] Yi-Qiang F., Hong-Liang W., Ke-Xin G., Jing-Ji L., Dong-Ping C., Applications of Modular Microfluidics Technology, *Chinese Journal of Analytical Chemistry,* **46**: 1863-1871 (2018).

[26] Xu J., Salari A., Wang Y., He X., Kerr L., Darbandi A., de Leon A.C., Exner A.A., Kolios M.C., Yuen D., Microfluidic Generation of Monodisperse Nanobubbles by Selective Gas Dissolution, *Small,* **17**: 2100345 (2021).

[27] Ferrari A., Fluid Dynamics of Acoustic and Hydrodynamic Cavitation in Hydraulic Power Systems, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, *Physical and Engineering Sciences,* **473**: 20160345 (2017).

[28] Nirmalkar N., Pacek A., Barigou M., Bulk Nanobubbles from Acoustically Cavitated Aqueous Organic Solvent Mixtures, *Langmuir,* **35**: 2188-2195 (2019).

[29] Zheng H., Zheng Y., Zhu J., Recent Developments in Hydrodynamic Cavitation Reactors: Cavitation Mechanism, Reactor Design, and Applications, *Engineering,* **19**: 180-198 (2022).

[30] Alam H.S., Sutikno P., Soelaiman T.A.F., Sugiarto A.T., Bulk Nanobubbles: Generation Using a Two-Chamber Swirling Flow Nozzle and Long-Term Stability in Water, *Journal of Flow Chemistry,* **12**: 161-173 (2022).

[31] Wu M., Song H., Liang X., Huang N., Li X., Generation of Micro-Nano Bubbles by Self-Developed Swirl-Type Micro-Nano Bubble Generator, *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification,* **181**: 109136 (2022).

[32] Iben U., Makhnov A., Schmidt A., Numerical Study of the Effects of Dissolved Gas Release in Cavitating Flow, AIP Conference Proceedings, *AIP Publishing LLC,* 030128 (2018).

[33] Wang B., Lu X., Tao S., Ren Y., Gao W., Liu X., Yang B., Preparation and Properties of CO_2 Micro-Nanobubble Water Based on Response Surface Methodology, *Applied Sciences,* **11**: 11638 (2021).

[34] Ferraro G., Jadhav A.J., Barigou M., A Henry's Law Method for Generating Bulk Nanobubbles, *Nanoscale,* **12**: 15869-15879 (2020).

[35] Wang Q., Zhao H., Qi N., Qin Y., Zhang X., Li Y., Generation and Stability of Size-Adjustable Bulk Nanobubbles Based on Periodic Pressure Change, *Scientific reports,* **9**: 1118 (2019).

[36] Yang X., Yang Q., Zhou L., Zhang L., Hu J., Nanobubbles Produced by Hydraulic Air Compression Technique, *Chinese Physics B,* **31**: 054702 (2022).

[37] Lee S., Sutomo W., Liu C., Loth E., Micro-Fabricated Electrolytic Micro-Bubblers, *International journal of multiphase flow,* **31**: 706-722 (2005).

[38] Yang S., Tsai P.A., Kooij E.S., Prosperetti A., Zandvliet H.J.W., Lohse D., Electrolytically Generated Nanobubbles on Highly Orientated Pyrolytic Graphite Surfaces, *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids,* **25(3)**: 1466-1474 (2008).

[39] Wilhelm E., Battino R., Wilcock R.J., Low-Pressure Solubility of Gases in Liquid Water, *Chemical Reviews,* **77**: 219-262 (1977).

[40] An H., Tan B.H., Zeng Q., Ohl C.D., Stability of Nanobubbles Formed at the Interface between Cold Water and Hot Highly Oriented Pyrolytic Graphite, *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids,* **32(43)**: 11212-11220 (2016).

[41] Qiu J., Zou Z., Wang S., Wang X., Wang L., Dong Y.-m., Zhao H., Zhang L., Hu J., Formation and Stability of Bulk Nanobubbles Generated by Ethanol-Water Exchange, *Chemphyschem : a European journal of chemical physics and physical chemistry,* **18(10)**: 1345-1350 (2017).

[42] Fang Z., Wang L., Wang X., Zhou L., Wang S., Zou Z., Tai R., Zhang L., Hu J., Formation and Stability of Surface/Bulk Nanobubbles Produced by Decompression at Lower Gas Concentration, *The Journal of Physical Chemistry C,* (2018).

[43] Wang L., Miao X., Pan G., Microwave-Induced Interfacial Nanobubbles, *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids,* **32(43)**: 11147-11154 (2016).

[44] Yuan K., Zhou L., Wang J., Geng Z., Qi J., Wang X., Zhang L., Hu J., Formation of Bulk Nanobubbles Induced by Accelerated Electrons Irradiation: Dependences on Dose Rates and Doses of Irradiation, *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids,* (2022).

[45] Wang Y., Li X., Zhou Y., Huang P., Xu Y., Preparation of Nanobubbles for Ultrasound Imaging and Intracelluar Drug Delivery, *International journal of pharmaceutics,* **384(1-2)**: 148-153 (2010).

[46] Liu R., Tang J., Xu Y., Dai Z., Bioluminescence Imaging of Inflammation in Vivo Based on Bioluminescence and Fluorescence Resonance Energy Transfer Using Nanobubble Ultrasound Contrast Agent, *ACS nano,* **13(5)**: 5124-5132 (2019).

[47] Patel PB., Latt S., Ravi K., Razavi M.. Clinical Applications of Micro/Nanobubble Technology in Neurological Diseases, *Biomimetics,* **9**: 645 (2024).

[48] Hamarat Sanlier S., Ak G., Yılmaz H., Ünal A.Z., Bozkaya Ü.F., Tanıyan G., Yıldırım Y., Yıldız Türkyılmaz G., Development of Ultrasound-Triggered and Magnetic-Targeted Nanobubble System for Dual-Drug Delivery, *Journal of pharmaceutical sciences,* **108(3)**: 1272-1283 (2019).

[49] Cavalli R., Bisazza A., Giustetto P., Civra A., Lembo D., Trotta G., Guiot C., Trotta M., Preparation and Characterization of Dextran Nanobubbles for Oxygen Delivery, *International journal of pharmaceutics,* **381(2)**: 160-165 (2009).

[50] Awlqadr F.H., Noreen S., Altemimi A.B., Mohammed O.A., Qadir S.A., Ahmed D.H., Alkanan Z.T., Tsakali E., Van Impe J.F.M., Kozak D., Abd El-Maksoud A.A., Ashraf M.A., Abedelmaksoud T.G., Advancement in Nanobubble Technology: Enhancing Drug and Nutraceutical Delivery With Focus on Bioavailability, *targeted therapy, safety, and sustainability, Frontiers in Nanotechnology,* (2025).

[51] Baram S., Weinstein M., Evans J.F., Berezkin A., Sade Y., Ben-Hur M., Bernstein N., Mamane H., Drip Irrigation With Nanobubble Oxygenated Treated Wastewater Improves Soil Aeration, *Scientia Horticulturae,* **291**: 110550 (2022).

[52] Liu S., Oshita S., Makino Y., Wang Q., Kawagoe Y., Uchida T., Oxidative Capacity of Nanobubbles and Its Effect on Seed Germination, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering,* **4**: 1347-1353 (2016).

[53] Usman Farid M., Jungwon Choi P., Kharraz J.A., Lao J.-Y., St-Hilaire S., Ruan Y., Kwan Sing Lam P., Kyoungjin An A., Hybrid Nanobubble-Forward Osmosis System for Aquaculture Wastewater Treatment and Reuse, *Chemical Engineering Journal,* (2022).

[54] Ahmadi M., Bidhendi G.N., Torabian A., Mehrdadi N., Effects of Nanobubble Aeration in Oxygen Transfer Efficiency and Sludge Production in Wastewater Biological Treatment, *Journal of Advances in Environmental Health Research,* **6**: 225-233 (2018).

[55] Jia M., Farid M.U., Kharraz J.A., Kumar N.M., Chopra, S.S. Jang A., Chew J., Khanal S.K., Chen G., An A.K., Nanobubbles in Water and Wastewater Treatment Systems: Small Bubbles Making Big Difference, *Water research,* **245**: 120613 (2023).

[56] Aber S., Chow C.W.K., Xing K., Rameezdeen R., Assessment of the Performance of Ozone Nanobubble Technology to Enhance Water Treatment Performance of a Constructed Floating Wetland, *Environments,* **12**: 202 (2025).

[57] Mensah K., Magdaleno A.L., Yaparatne S., Garcia-Segura S., Apul O.G., Emerging Investigator Series: Suspended air Nanobubbles in Water can Shuttle Polystyrene Nanoplastics to Air-Water Interface, *Environmental Science: Nano,* **11**: 3271 (2024).

[58] Nuo J., Fenghua Z., Yan C., Le S., Gao H., Pu Z., Yang W., Environment-Friendly Surface Cleaning Using Micro-Nano Bubbles, *Particuology,* **66**: 1-9 (2021).

[59] Wu Z., Chen H., Dong Y.-m., Mao H., Sun J., Chen S., Craig V.S.J., Hu J., Cleaning Using Nanobubbles: Defouling by Electrochemical Generation of Bubbles, *Journal of colloid and interface science,* **328(1)**: 10-14 (2008).

[60] Ramisetti S.B., Borg M.K., Lockerby D.A., Reese J.M., Liquid Slip Over Gas Nanofilms, *Physical Review Fluids,* **2**: 084003 (2017).

[61] Gao Y., Li J., Shum H.C., Chen H., Drag Reduction by Bubble-Covered Surfaces Found in PDMS Microchannel Through Depressurization, *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids,* **32(19)**: 4815-4819 (2016).

[62] Abdolkarimi-Mahabadi M., Bayat A., A Review on the Separation of Nanoparticles by Froth Flotation, Journal of Water and Wastewater; *Ab va Fazilab (in persian),* **34**: 104-124 (2023).

[63] Chen G.N., Ren L., Zhang Y., Bao S., Improvement of Fine Muscovite Flotation Through Nanobubble Pretreatment and Its Mechanism, *Minerals Engineering,* **189**: 107868 (2022).

[64] Zhang D., Ma F., Tao Y., Study on Effect of Nanobubble on Ultra-Fine Flake Graphite (UFG) Flotation, *Particulate Science and Technology,* **41**: 1062-1070 (2023).

[65] Aikawa A., Kioka A., Nakagawa M., Anzai S., Nanobubbles as Corrosion Inhibitor in Acidic Geothermal Fluid, Geothermics, **89**: 101962 (2021).

[66] Weijs J.H., Lohse D., Why Surface Nanobubbles Live for Hours, *Physical review letters,* **110(5)**: 054501 (2012).

[67] Zhang X., Lhuissier H., Sun C., Lohse D., Surface Nanobubbles Nucleate Microdroplets, *Physical review letters,* **112(14)**: 144503 (2014).

[68] Hayden S.C., Chisholm C., Grudt R.O., Aguiar J.A., Mook W.M., Kotula P.G., Pilyugina T.S., Bufford D.C., Hattar K.M., Kucharski T.J., Taie I., Ostraat M.L., Jungjohann K.L., Localized corrosion of Low-Carbon Steel at the Nanoscale, *npj Materials Degradation,* **3**: 1-9 (2019).

[69] Heuvel D.B.v.d., Gunnlaugsson E., Gunnarsson I., Stawski T.M., Peacock C.L., Benning L.G., Understanding Amorphous Silica Scaling Under Well-Constrained Conditions Inside Geothermal Pipelines, *Geothermics,* (2018).

[70] Okazaki T., Orii T., Ueda A., Ozawa A., Kuramitz H., Fiber Optic Sensor for Real-Time Sensing of Silica Scale Formation in Geothermal Water, *Scientific Reports,* **7**: 3387 (2017).

[71] Yaxin L., Zhou Y., Wang T.-Y., Pan J.-q., Zhou B., Muhammad T., Zhou C., Li Y., Micro-Nano Bubble Water Oxygation: Synergistically Improving Irrigation Water Use Efficiency, Crop Yield and Quality, *Journal of Cleaner Production,* **222**: 835 (2019).

[72] Yanagisawa N., Masuda Y., Osato K., Sato M., Kasai K., Sakura K., Fukui T., The Materia l Corrosion Test Using Small Loop System at Geothermal Power Plant in JAPAN, *Proceedings of the 42nd workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford, CA,* (2017).

[73] Mirzaee M., Rezaei Abadchi M., Rashidi A., A Review of the Application of Two-Dimensional Nanosheets as a Reinforcement to Increase the Corrosion Resistance of Polymer Coatings, *Journal of Studies in Color World,* **13**: 95-132 (2023).

[74] Zhang Y., Lu S., Li D., Duan H., Duan C., Zhang J., Liu S., Inhibition Mechanism of Air Nanobubbles on Brass Corrosion in Circulating Cooling Water Systems, *Chinese Journal of Chemical Engineering,* **62**: 168-181 (2023).

[75] Mirzaee M., Mohebbi T., A Review of Anti-Corrosion and Erosion Protective Coatings in Offshore Wind Power Devices, *Journal of Studies in Color World,* **14**: 133-159 (2024).

[76] Katagiri N., Kioka A., Nonoyama M., Hayashi Y., Inhibiting Flow-Accelerated Copper Corrosion Under Liquid Jet Impingement by Utilizing Nanobubbles, *Surfaces and Interfaces,* **40**: 103067 (2023).

[77] Mirzaee M., yousefpour A., Mohebbi T., A Review of Methods for Controlling and Monitoring Microbial Corrosion in Power Plant Cooling Sections, *Farayandno,* **19**: 20-36 (2024).

[78] Mirzaee M., Kianpour E., Rashidi A., Rahimi A., Pourhashem S., Duan J., Iravani D., Sirati Gohari M., Construction of a High-Performance Anti-Corrosion Epoxy Coating in the Presence of Poly(Aniline-Co-Pyrrole) Nanospheres, *Reactive and Functional Polymers,* **194**: 105794 (2024).

[79] Mirzaee M., Mohebbi T., A Review of High Heat Transfer Coatings in Steam Power Plant Condensers, *Farayandno,* **18**: 75-98 (2024).