

کاربردهای فناوری نانو حباب در تصفیه آب و فاضلاب



شناسنامه

ستاد توسعه فناوری های نانو و میکرو

گروه رصد و تولید محتوای بخش ترویج صنعتی

طراحی و اجرا:	توسعه فناوری مهر ویژن	تلفن:	۰۲۱-۶۳۱۰۰
نظارت:	داود قرایلو	نمابر:	۰۲۱-۶۳۱۰۶۳۱۰
صندوق پستی:	۱۴۵۶۵-۳۴۴		
پست الکترونیک:	IND@nano.ir	پایگاه اینترنتی:	www.nano.ir www.INDnano.ir
سال انتشار:	۱۴۰۳		
تهیه کننده:	شرکت پیشگامان فناوری دریچه	اینستاگرام نانو و صنعت:	@INDnano.ir

محتوای صنعتی و فناوری خود را از طریق پست الکترونیک و پایگاه اینترنتی نانو و صنعت (INDnano.ir) ارسال نمایید.

فهرست مطالب

۳	مقدمه
۳	اهمیت و کاربرد فناوری نانو حباب
۵	مزایای فناوری نانو حباب
۷	بازار جهانی و تولیدکنندگان داخلی
۸	جمع بندی
۸	پی نوشت ها
۸	منابع

مقدمه

اگرچه ۷۰ درصد از سطح زمین با آب پوشیده شده است، اما تنها ۳ درصد از این آب به اندازه کافی پاک و قابل استفاده برای مصارف آشامیدنی است [۱]. با توجه به این کمبود آب شیرین در زمین و افزایش جمعیت جهانی، تأمین آب یکی از چالش‌های پیش روی بشر است. از آن سو، رشد شهرنشینی و صنعتی شدن، آلودگی منابع آب ناشی از تخلیه فاضلاب‌های صنعتی و شهری را در پی داشته است [۲]. فاضلاب تخلیه شده از بسیاری از صنایع شامل مقادیر قابل توجهی مواد آلی و معدنی است که باید برای تخلیه به محیط زیست یا برای استفاده مجدد پاک‌سازی شود. تغییرات آب‌وهوایی و شدت بارندگی نیز ممکن است منجر به جابه‌جایی آلودگی و ورود آن به منابع آب شود [۳]. به همین دلیل مسئله تصفیه آب و بازیافت فاضلاب، یک چالش مهم و قابل سرمایه‌گذاری است. از بین روش‌های تصفیه آب، فناوری نانوحباب به دلیل سادگی و کم‌هزینه بودن و همچنین بازده بالا، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. در این گزارش، پس از ذکر برخی مشکلات روش‌های رایج، مزایای استفاده از فناوری نانوحباب شرح داده شده است. در انتها بازار جهانی استفاده از این فناوری و همچنین تولیدکنندگان داخلی این فناوری معرفی شده‌اند.

اهمیت و کاربرد فناوری نانوحباب

روش‌های بسیاری برای تصفیه آب به کار رفته است. به عنوان مثال کلرزنی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، پرکاربردترین ضد عفونی‌کننده میکروب‌های (میکروارگانیسم) بیماری‌زا در آب و فاضلاب بوده است. با این حال، محصولات جانبی نامطلوب مرتبط، غیرفعال‌سازی ضعیف برخی ویروس‌ها در دوز پایین، افزایش هزینه تا ۳۰ درصد برای کاهش سمیت، از چالش‌های روش کلرزنی است [۳]. یک روش دیگر برای تصفیه آب، استفاده از گاز ازن است. گاز ازن (O_3) یک اکسیدکننده و ضد عفونی‌کننده قوی است و واکنش‌پذیری بالا نسبت به بسیاری از آلاینده‌ها دارد. همچنین می‌تواند در محل استفاده، تولید شود و خود می‌تواند به اکسیژن تجزیه شود. این موارد گاز ازن را به اکسیدان ترجیحی در تصفیه آب و فاضلاب تبدیل کرده است. این گاز برای رنگ‌زدایی از پساب نیز کاربرد دارد. با این حال مطابق جدول ۱ استفاده از آن برای تصفیه آب با محدودیت‌هایی مانند حلالیت و ماندگاری کم روبه‌رو است.

جدول ۱- مشکلات فرایند تصفیه آب با گاز ازن (بدون استفاده از فناوری نانوحباب) [۳]

مشکل	نتیجه
حلالیت کم گاز ازن در آب	بازده کم فرایند تصفیه
پایداری و ماندگاری کم ازن در آب	بازده کم فرایند تصفیه
الزام استفاده از دوز بیش از حد	هزینه بالای فرایند ازن‌زنی (به دلیل جبران حلالیت کم گاز، دوز بیشتری وارد آب می‌شود.)
تشکیل برومات	تولید یک فرآورده مضر و سرطان‌زا (به دلیل تزریق دوز بیش از حد ازن، برومات تشکیل می‌شود.)
اکسید نکردن و از بین نبردن برخی آلودگی‌ها	ماندگاری آلودگی‌هایی مانند آمونیاک، آفت‌کش‌ها، حلال‌های کلردار و...

تحقیقات بسیاری صورت گرفت تا بتوان محدودیت های فوق را برطرف کرد، روشی که بتواند حلالیت گاز ازن را در آب افزایش دهد، اکسیداسیون سریع مواد آلی را برای حذف آن ها انجام دهد و همچنین اتلاف ازن در آب و فاضلاب را کاهش دهد. در گذشته، توجه زیادی بر روی فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته^۱ ازن بود. در اکسیداسیون پیشرفته از H_2O_2 ، اشعه فرابنفش، اولتراسوند، کاتالیزور، یون های فلزی، اکسیدهای فلزی یا کربن فعال برای افزایش کارایی ازن زنی استفاده می شد. با این حال، این روش ها به دلیل پیچیدگی و هزینه بالا و بازده کم، کاربرد زیادی پیدا نکرد.

بررسی بیشتر یک روش کارآمد که بازده و توانایی اکسیداسیون ازن را افزایش می دهد، در نهایت پژوهشگران را به تغییر ابعاد حباب های گاز ازن رساند. آن ها دریافتند با وارد کردن حباب های ریزتر دارای گاز ازن به داخل آب، می توانند انحلال گاز را در آب افزایش دهند و باعث تجزیه بیشتر آلودگی های بستر آب شوند [۳]. به این صورت که حباب هایی در ابعاد میکرو و نانومتر^۲ تولید شده از هوا و نیتروژن می توانند فعالیت میکروارگانیسم ها و یا باکتری ها را در شرایط بی هوازی و هوازی افزایش دهند تا تجزیه آلاینده های داخل آب و رسوب تسریع شود. برای بررسی کارایی فناوری میکرو و نانوحباب، از آن در احیای دو رودخانه با بوی نامطبوع و رنگ تیره در جنوب چین استفاده شد. نتایج نشان داد که شاخص های آلودگی آب مانند DO، نیتروژن آمونیاکی، فسفر، اکسژن مورد نیاز شیمیایی، شفافیت آب و تعداد کلیفرم ها به طور قابل توجهی بهبود یافتند. همچنین مشاهده شد که حباب در این ابعاد به طور مؤثرتری جذب و حذف جامدات معلق، تجزیه شدید آلاینده های آلی، گندزدایی و رنگ زدایی را انجام می دهد. آن ها دریافتند که این روش کارایی شفاف سازی فاضلاب را در مقایسه با فرایند لخته سازی سنتی رسوب، ۴۰ درصد افزایش می دهد و بیش از ۹۵ درصد کدورت، جامدات و سیلیس را از آب حذف می کند. بدین ترتیب فناوری حباب های میکرو و نانو^۳، یک فناوری ساده، کارآمد، کم هزینه و سازگار با محیط زیست برای حذف آلاینده های نفتی و ذرات ریز از فاضلاب شناخته شد [۴].

فرایند شناورسازی برای حذف مواد آلی، روغن ها، پودرها و یون های فلزی از آب به کار می رود. ابعاد حباب تزریق شده به آب، تأثیر زیادی بر فرایند شناورسازی دارد. نانوحباب ها^۴ با گسترش ناحیه عملیاتی و افزایش آب گریزی ذرات سطحی، کارایی شناور کردن سموم برای حذف و جداسازی آن ها را افزایش داده اند [۱]. در بررسی دیگری، برای پاک سازی جرم موجود در سیستم گردش و ذخیره آب، از نانوحباب گاز ازن استفاده شد. مشاهده شد که نانوحباب، ضد عفونی و تمیزکنندگی بالایی در مخزن آب ایجاد کرده است و توانسته از رشد پاتوژن ها (ارگانیسم هایی که باعث ایجاد بیماری می شوند)، جلوگیری کند [۳].

از ویژگی های مهم نانوحباب ها، طول عمر بالا برای ماندن در محلول، بالا بودن فشار داخل حباب، نسبت سطح به حجم بسیار بزرگ، سرعت انحلال گاز بالا و تولید بیشتر رادیکال های آزاد است [۲]. از حباب های میکرو و نانو در تصفیه آب از جمله بخش شناورسازی، بخش هوادهی، ازن زنی، تخریب و ضد عفونی استفاده می شود. شکل ۱، برخی کارکردهای حباب ریز در تصفیه آب را ذکر می کند [۱].

اکسیداسیون فلزات
سنگین و مواد معدنی
و تخریب آلودگی آلی

غیرفعال سازی
میکروب با
کایتاسیون

افزایش جذب مواد و
کمک به شناورسازی
آن

تنه نشینی و
لخته سازی آلودگی

در گذشته براساس محاسباتی^۵، گمان می‌کردند که نانوحباب نمی‌تواند وجود داشته باشد. طبق این محاسبات، در مقیاس نانو، به دلیل شعاع انحنای بسیار کوچک، فشار داخلی حباب به‌طور قابل توجهی بیشتر از فشار خارجی خواهد بود. در نتیجه بایستی فشار بالای داخل حباب بلافاصله باعث ترکیدن آن شود. به‌عنوان مثال، یک نانوحباب با شعاع ۱۰۰ نانومتر، فشار داخلی ۱,۵۰۰,۰۰۰ پاسکال (یک میلیون و پانصد هزار پاسکال) را ایجاد می‌کند، درحالی که فشار اتمسفر در آب اطراف حباب ۱۰۵ پاسکال است. همچنین نیروی کشش سطحی که بخواهد مرز حباب را حفظ کند و از فروپاشی آن جلوگیری کند نیز بسیار کم (۰.۷۲ پاسکال) به دست آمد. این مقدار اختلاف بین فشار داخل و خارج حباب، این نکته را به ذهن متبادر می‌کرد که حباب به ناچار دچار فوران در مدت زمان بسیار کوتاهی می‌شود. تا اینکه محققان با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی^۶، وجود و پایداری نانوحباب‌ها را به‌صورت تجربی بر روی سطوح جامد مسطح اتمی مشاهده و اثبات کردند [۲].

مزایای فناوری نانوحباب

مزایای استفاده از حباب ریزتر در ابعاد میکرو و نانو، برای انحلال گاز در آب به هدف تصفیه، در ادامه ذکر شده است.

■ نسبت سطح به حجم بالاتر

در رابطه زیر، مساحت حباب به حجم حباب تقسیم شده است.

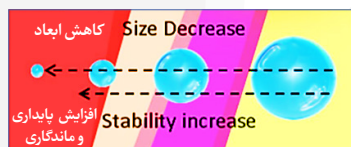
$$S = 4\pi r^2, \quad V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$\frac{S}{V} = \frac{3}{r}$$

که در آن S مساحت سطح حباب، V حجم داخل حباب و r شعاع حباب است. مطابق رابطه فوق با کاهش شعاع r ، نسبت سطح به حجم ($\frac{S}{V}$) افزایش می‌یابد.^۷ در نتیجه در صورتی که بتوان از شعاع کمتر (حباب ریزتر) استفاده کرد، در همان حجم، سطح بیشتری تأمین می‌شود که با آلودگی آب، تماس دارد. بدین ترتیب با مقدار کم ماده نیز می‌توان بازده مورد نیاز را فراهم کرد و در مقدار ماده صرفه جویی نمود و واکنش‌های جانبی نامطلوب (که به علت تزریق دوز بالای ماده رخ می‌دهند) را نیز کنترل کرد [۴].

■ زمان ماندگاری بالاتر در آب

حباب‌های بزرگ، زودتر از حباب‌های ریز به سطح آب می‌آیند و می‌ترکند. تحقیقات نشان داده که حباب‌های نانو، گاهی تا ماه‌ها در اعماق آب باقی می‌مانند [۴]. نانوحباب‌ها شناوری کمتری دارند یا فاقد نیروی شناور مجازی هستند^۸ و از این رو، تمایلی به بالا رفتن در محلول ندارند (قطر حباب کمتر از ۵ میکرومتر، در محلول بالا نمی‌آید). حباب‌هایی با قطر بیش از ۱ میلی‌متر به سرعت بالای می‌روند و روی سطح می‌ترکند. همچنین بر روی سطح نانوحباب، پیوند هیدروژنی برقرار می‌شود که در ماندگاری مؤثر است [۴]. نانوحباب‌ها زاویه تماس بالایی دارند که باعث شده، انحنای سطحی آن‌ها کمتر از حد انتظار باشد و همین موجب پایداری بیشتر آن‌ها در آب شده است [۵].



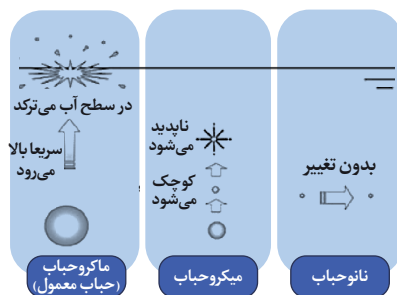
شکل ۲- ارتباط قطر حباب با میزان پایداری آن [۱]

■ افزایش حلالیت یک گاز در آب

معادله زیر، رابطه لاپلاس - یانگ است. براساس این رابطه، با کاهش شعاع، فشار گاز داخل حباب، افزایش می یابد. به عنوان مثال، برای حباب با قطر ۱ میکرومتر در ۲۹۸ کلوین، فشار داخلی حدود ۳۹۰,۰۰۰ پاسکال (تقریباً چهارصد هزار) است که تقریباً چهار برابر بیشتر از فشار اتمسفر (صد هزار پاسکال) است. با افزایش فشار گاز داخل حباب، مطابق قانون هنری، توانایی انحلال حباب در آب بیشتر می شود.

$$P_{\text{گاز داخل حباب}} = P_{\text{مائع}} + \frac{\gamma \cos \theta}{r_{\text{شعاع حباب}}}$$

مطابق شکل ۳، حباب های بزرگ تر، به سرعت بالا آمده و در سطح آب، می ترکند. حباب های میکرو با سرعت کمتری بالا آمده، کم کم کوچک تر می شود. با کوچک تر شدن حجم آن، فشار گاز داخلی افزایش یابد. طبق قانون هنری، با افزایش فشار داخلی گاز، مولکول های گاز می خواهند کم کم از حباب خارج شده و در آب حل شوند که می تواند حلالیت گاز در آب را به حالت اشباع بیش از حد برساند. نانوحباب ها اما مطابق شکل، مدت زمان زیادی را در همان ارتفاع باقی مانده و بالا نمی آیند و ماندگاری بالاتری دارند [۴].



شکل ۳- نمای حباب ماکرو (بزرگ)، میکرو و نانو [۴]

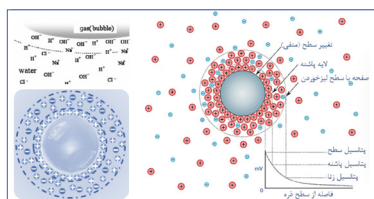
■ راندن انتقال جرم بالا از حباب به آب

سطح ویژه حباب، بازده انتقال جرم گاز را تعیین می کند. به عبارتی هنگامی که شعاع حباب کاهش می یابد، فشار داخلی حباب افزایش یافته و نرخ خروج گاز حباب به سمت مایع اطراف افزایش می یابد که باعث افزایش بازده تصفیه خواهد شد [۴].

■ پتانسیل زتای بالا

یون های باردار در اطراف مرز نانوحباب می توانند یک لایه دوگانه الکتریکی ایجاد کنند که در شکل ۴ نشان

داده شده است. پتانسیل الکتریکی این مرز، یک عامل حیاتی برای تعیین عملکرد جذب سطح حباب است. هنگامی که نانوحباب‌ها در آب منقبض و کوچک‌تر می‌شوند، یون‌های باردار به سرعت در پیرامون حباب در لایه‌ای بسیار باریک، متمرکز می‌شوند. این باعث افزایش قابل توجهی در پتانسیل زتا خواهد شد. مقادیر پتانسیل زتا در محدوده وسیعی از شرایط pH، منفی است. نانوحباب‌ها در شرایط اسیدی قوی، بار مثبت دارند [۴]. پتانسیل زتا، پتانسیل الکتریکی یون‌های H^+ و OH^- آب است که دور تا دور یک حباب گاز، قرار می‌گیرند. اگر مقدار این بار زیاد باشد (منفی زیاد یا مثبت زیاد باشد، یعنی تعداد یون‌های H^+ و OH^- پیرامون حباب، با هم برابر نباشند و اختلاف زیادی داشته باشند)، حباب، پایدارتر می‌ماند و دیرتر می‌ترکد [۶].



شکل ۴- پتانسیل زتا [۶][۱][۴]

■ تولید رادیکال آزاد به صورت خودبه خود

هنگامی که میکرو و نانوحباب‌ها در آب، منقبض می‌شوند و در نهایت فرو می‌ریزند، ناپدید شدن فصل مشترک گاز-مایع منجر به تغییرات شدیدی می‌شود که می‌تواند انرژی انباشته شده توسط غلظت بالایی از یون‌های مثبت و منفی (مربوط به پتانسیل زتا) که در سطح مشترک حباب قرار گرفته بودند را آزاد کند تا توده زیادی از رادیکال‌های هیدروکسیل (OH^*) تولید شود. تعداد رادیکال‌های آزاد تولید شده تا حدی تحت تأثیر نوع گاز داخل حباب نیز است [۴]. رادیکال هیدروکسیل یک اکسیدکننده قوی‌تر از گاز آزن است. این رادیکال به راحتی با ترکیبات آلی مختلف واکنش می‌دهد و آن‌ها را تجزیه می‌کند. رادیکال‌های هیدروکسیل و همچنین امواج ضربه‌ای ناشی از فروپاشی حباب‌ها، باکتری اشرشیاکلی در آب را از بین می‌برد [۳].

بازار جهانی و تولیدکنندگان داخلی

براساس ارزیابی در سال ۲۰۲۲، فروش انواع ژنراتورهای نانوحباب‌ساز در دنیا به بیش از ۳۳ میلیون دلار رسید. پیش‌بینی شده است این میزان از فروش تا سال ۲۰۳۰ به بیش از ۸۵ میلیون دلار در سراسر دنیا افزایش خواهد یافت. در حال حاضر شرکت مولار مستقر در ایالت کالیفرنیا آمریکا، توانسته بیش از ۳۶ درصد از بازار فروش انواع ژنراتورهای نانوحباب سراسر دنیا را به خود اختصاص دهد. پس از شرکت مولار، شرکت آکنتی ژاپن بیش از ۸ درصد از بازار ژنراتورهای نانوحباب‌ساز را به خود اختصاص داده است. از میان کاربردهای صنعتی فناوری نانوحباب، پیش‌بینی می‌شود که صنعت آبی‌پروری بیش‌ترین استفاده از ژنراتورهای نانوحباب‌ساز را داشته باشد و پس از آن صنایع نظیر کشاورزی، نیمه‌هادی‌ها، تصفیه آب، نفت و گاز و معدن رتبه‌های بعدی را به خود اختصاص می‌دهند. در حال حاضر بزرگ‌ترین بازار مصرف فناوری نانوحباب، منطقه آمریکای شمالی است و پس از آن، آسیای جنوب شرقی، اروپا، آمریکای لاتین و خاورمیانه رتبه‌های بعدی را به خود اختصاص داده‌اند [۷]. در ایران، چندین شرکت در حوزه توسعه فناوری نانوحباب، نقش ایفا کرده‌اند. از جمله دستگاه نانوحباب‌ساز

برای تصفیه آب، توسط شرکت های نانوحباب انرژی در استان آذربایجان غربی، شرکت نانوفناوری سراج در استان تهران، شرکت پیام آوران نانوفناوری فردانگر در استان تهران و شرکت پیشگامان نانوحباب فردانگر در تهران طراحی و ساخته شده است. همچنین دستگاه پمپ ورنکس دو فازی (میکرو - نانوحباب ساز)، توسط شرکت دانا تجهیز پترو آب در استان اصفهان توسعه داده شده است [۸].

جمع بندی

برخی روش های تصفیه آب با استفاده از انحلال یک گاز در آب انجام می شود. با این حال، حلالیت و ماندگاری کم این گازها در آب، بازده فرایند تصفیه را با مشکل مواجه می کند. از بین راهکارهای مختلف، فناوری نانوحباب، به دلیل سادگی و بازده بالا و هزینه کم، کارآمدی خود را در تصفیه آب و فاضلاب ثابت کرده است. برخی گازها در ابعاد نانوحباب، می توانند آلودگی های آب را با بازده بالایی تجزیه کنند. برخی مواد آلی را جذب و روی سطح آب شناور کنند تا به راحتی از آب جدا شود. همچنین می توانند لخته سازی و رسوب برخی آلودگی ها را برای جداسازی از آب افزایش دهند. فناوری نانوحباب نیاز به ژنراتورهای تولیدکننده حباب در این ابعاد را دارد که بازار آن تا سال ۲۰۳۰ میلادی به بیش از ۸۵ میلیون دلار در دنیا خواهد رسید. در ایران نیز پنج شرکت توانستند این تجهیزات را طراحی کرده و توسعه دهند.

پی نوشت ها

۱ Advanced Oxidation Processes (AOPs)

۲ MNB

۳ MNBT

۴ NB

۵ ترمودینامیک کلاسیک براساس محاسبات معادله یانگ-لاپلاس

۶ AFM

۷ با کاهش منحنی یک کسر، کل کسر افزایش می یابد (پ بزرگتر از پ ب).
افزایش نسبت سطح به حجم یعنی با همان مقدار دبی گاز کمتر، می توان سطح بیشتری از حباب که در مواجهه با آلودگی است را به دست آورد.

۸ نیروی شناوری، نیرویی است که از طرف آب، به سمت بالا به حباب (شیء شناور در آب) وارد می شود.

۹ به عنوان مثال، پتانسیل زتا برای حباب دارای گاز اکسیژن در آب ۳۴ تا ۴۵ میلی ولت، برای هوا ۱۷ تا ۲۰ میلی ولت، برای نیتروژن ۲۹ تا ۳۵ میلی ولت، برای دی اکسیدکربن ۴۰ تا ۲۷ میلی ولت و برای گزنون ۱۱ تا ۲۲ میلی ولت است.

منابع

- ۱ "Effect and application of micro and nanobubbles in water purification," Toxicology and Environmental Health Sciences, vol. 13, p. 9-16, 2021.
- ۲ K. J. Anup Gurung, "The fundamental phenomena of nanobubbles and their behavior in wastewater treatment technologies," geosystem Engineering, 2016.
- ۳ "Applications of Ozone Micro- and Nanobubble Technologies in Water and Wastewater Treatment: Review," Journal of Korean Society of Water and Wastewater, vol. 31, no. 6, pp. 481-490, 2017.
- ۴ L. Zhengguo Xiao, "Applications of micro-nano bubble technology in environmental pollution control," Micro & Nano Letters, vol. 14, no. 7, p. 782-787, 2019.
- ۵ L. Ashutosh Agarwal, "Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment, Review," Chemosphere, vol. 84, p. 1175-1180, 2011.
- ۶ <https://www.acniti.com/fa/technology/zeta-potential-ultrafine-bubbles>
- ۷ <https://INDnano.ir/16257>
- ۸ <https://INDnano.ir/14777>