



نانو حباب آرمان
NANOBUBBLE ARMAN

نانو حباب در آبی پروری

افزایش تولید، تصفیه آب در گردش
و کنترل بیماری‌ها

تابستان ۱۴۰۵



سلام الغزالي



شناسنامه کتاب

نانوحباب در آبی پروری: افزایش تولید، تصفیه آب در گردش و
کنترل بیماری‌ها

عنوان

محمد مهدی رضایی

نویسنده

شرکت پارسیان نانوفناور آرمان

ناشر

تابستان ۱۴۰۵

سال انتشار

چاپ اول

نوبت چاپ

۱۰۰۰ نسخه

شمارگان

۴۵ صفحه

تعداد صفحات

آبی پروری - فناوری نانوحباب - تصفیه آب - کنترل بیماری‌ها

موضوع

فارسی

زبان

فهرست مطالب

بخش	عنوان	صفحه
	پیشگفتار	۶
فصل اول	نانوحباب چیست و چرا در آبی‌پروبی اهمیت دارد؟	۷
	تعریف نانوحباب	۷
	ویژگی‌های منحصربه‌فرد نانوحباب -	۷
	فصل دوم: نانوحباب برای افزایش برداشت در آبی‌پروبی	۸
۲.۱	افزایش تولید ماهی	۹
۲.۲	تأثیر بر میکروبیوم روده آبزیان	۱۱
۲.۳	ارزیابی اقتصادی	۱۲
۲.۴	دوره بازگشت سرمایه	۱۴
فصل سوم	نانوحباب برای تصفیه فاضلاب آبی‌پروبی	۱۴
۳.۱	تخریب آنتی‌بیوتیک‌ها با نانوحباب	۱۷
۳.۲	تأثیر بر گرفتگی غشا	۱۸
۳.۳	حذف آمونیاک، نیتریت و نیترات با نانوحباب	۱۹
۳.۴	حذف آمونیاک در سیستم مدار بسته	۲۱
فصل چهارم	نانوحباب برای کنترل بیماری‌ها و بهبود سیستم ایمنی	۲۳
۴.۱	کنترل باکتری‌های بیماری‌زا	۲۳
۴.۲	کنترل ویروس‌ها	۲۶
۴.۳	بهبود سیستم ایمنی با نانوحباب ازن	۲۹

۳۲	اثر نانوحباب بر کاهش مصرف دارو	۴.۴
۳۴	مروری بر توصیه‌های کاربردی	فصل پنجم
۳۵	تامین اکسیژن مورد نیاز در پرورش ماهیان سردآبی	فصل ششم
۳۵	نیاز اکسیژنی قزل‌آلا	۶.۱
۳۶	مقایسه اکسیژن‌رسانی و هوادهی در پرورش ماهیان سردابی	۶.۲
۳۶	تأثیر بر کیفیت آب	۶.۳
۳۷	تراکم قابل نگهداری	۶.۴
۳۷	اقتصاد پرورش: هزینه تولید و بازگشت سرمایه	۶.۵
۳۸	نانوحباب به عنوان گزینه پیشرفته	۶.۶
۴۲	توصیه‌های عملی برای پرورش دهندگان	
۴۳	پاسخ به سؤالات متداول	
۴۴	منابع	

نانوحباب در آبرزی پروری: افزایش تولید، تصفیه آب در گردش و کنترل بیماری‌ها

پیشگفتار

صنعت آبرزی پروری (پرورش ماهی، میگو و سایر آبزیان) یکی از سریع‌ترین صنایع غذایی در حال رشد در جهان است. با افزایش جمعیت و نیاز به منابع پروتئینی پایدار، این صنعت با چالش‌های متعددی مانند تأمین اکسیژن کافی برای آبزیان در تراکم‌های بالا، کنترل بیماری‌های ویروسی و باکتریایی بدون استفاده بیش از حد از آنتی‌بیوتیک‌ها، تصفیه فاضلاب حاوی مقادیر بالای نیتروژن، فسفر و مواد آلی و کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بهره‌وری مواجه است.

در سال‌های اخیر، فناوری نانوحباب به عنوان یک راه‌حل نوین و مؤثر در آبرزی پروری مطرح شده است. فناوری نانوحباب به عنوان یکی از راهکارهای نوین در آبرزی پروری، با بهبود اکسیژن‌رسانی، تصفیه کارآمد آب در گردش و کنترل عوامل بیماری‌زا، پتانسیل افزایش چشمگیر تولید و پایداری زیست‌محیطی مزارع را فراهم می‌کند. در این مقدمه، مبانی علمی نانوحباب‌ها و نقش آن‌ها در سه محور «افزایش تولید»، «تصفیه آب در گردش» و «کنترل بیماری‌ها» مرور می‌شود.

این کتابچه، به طور کامل به سه حوزه اصلی کاربرد نانوحباب در آبرزی پروری شامل بهبود برداشت و افزایش بهره‌وری با استفاده از نانوحباب‌های اکسیژن و هوا، تصفیه فاضلاب آبرزی پروری با استفاده از نانوحباب‌ها و کنترل بیماری‌ها و بهبود سیستم ایمنی آبزیان به ویژه ماهیان سردابی بر اساس منابع علمی منتشر شده پرداخته است.

فصل اول: نانوحباب چیست و چرا در آبی‌پروری اهمیت دارد؟

تعریف نانوحباب

نانوحباب، حباب‌های بسیار ریز گاز در آب است که معمولاً اندازه‌ای در مقیاس نانو دارند و به دلیل کوچک بودن، مدت طولانی‌تری در آب باقی می‌مانند و سطح تماس بسیار بالایی ایجاد می‌کنند. در آبی‌پروری، این ویژگی باعث می‌شود انتقال اکسیژن مؤثرتر شود، کیفیت آب بهتر بماند و فشار تنفسی و استرس آبزیان کاهش یابد. نانوحباب‌ها، حباب‌های گازی با قطر کمتر از ۱ میکرومتر (معمولاً ۵۰-۵۰۰ نانومتر) هستند و برخلاف حباب‌های معمولی به سطح نمی‌آیند. بنابراین برای انتقال گازهایی مثل اکسیژن، هوا یا حتی ازن در سیستم‌های پرورش ماهی و مدار بسته بسیار مفیدتر هستند. برای مقایسه در جدول ذیل، ویژگی‌های انواع حباب‌ها آورده شده است:

جدول ۱: مقایسه انواع نانوحباب از نظر اندازه و ویژگی‌ها

نوع حباب	قطر	ویژگی‌ها
حباب درشت (Macrobubble)	۱۰۰ تا ۲۰۰۰ میکرومتر	سریع به سطح آب می‌رود، ماندگاری کم
میکروحباب (Microbubble)	۱ تا ۱۰۰ میکرومتر	ماندگاری متوسط، قابل مشاهده با چشم غیر مسلح (کدری آب)
نانوحباب (Nanobubble)	کمتر از ۱ میکرومتر	ماندگاری بسیار طولانی (روزها تا ماه‌ها)، شفاف، حرکت براونی

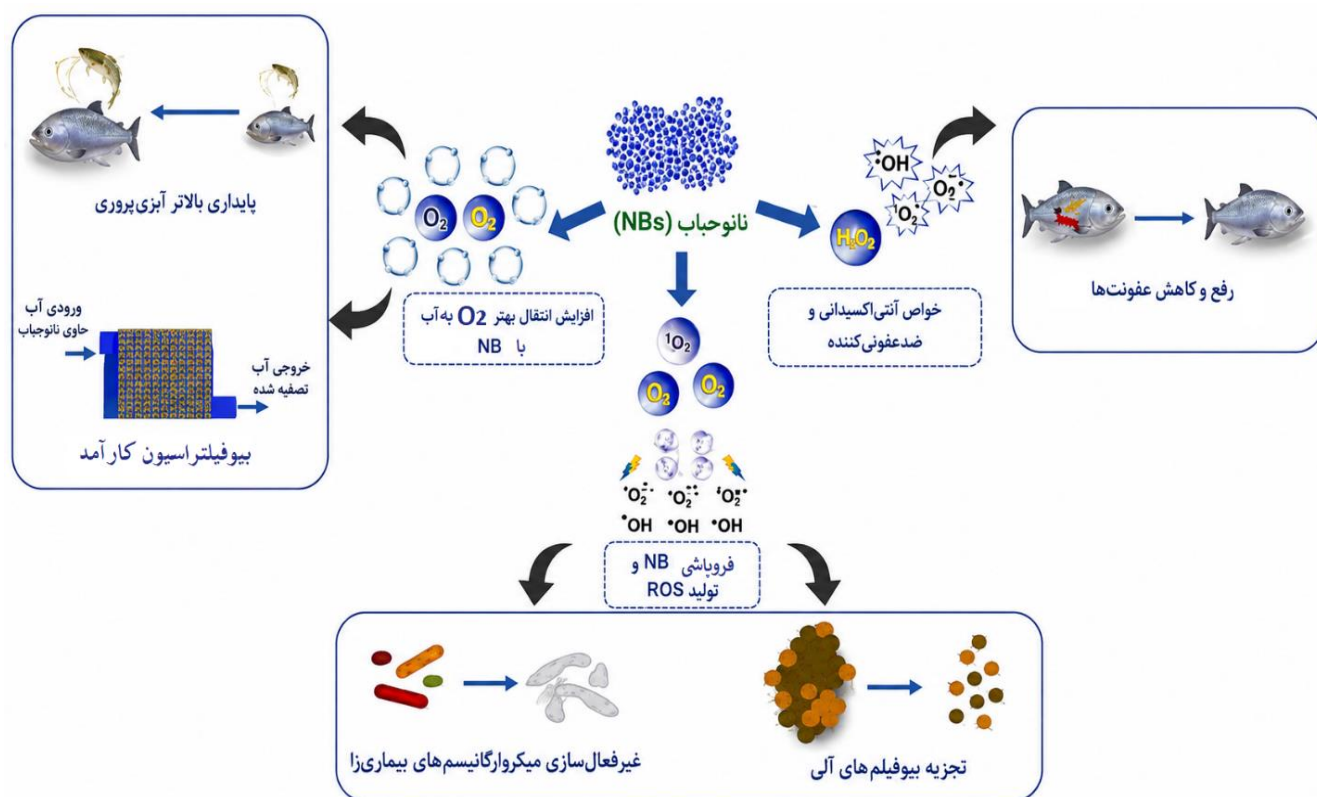
ویژگی‌های منحصر به فرد نانوحباب

۱. ماندگاری طولانی: به دلیل اندازه بسیار کوچک و بار منفی سطحی، نانوحباب‌ها برای روزها و حتی هفته‌ها در آب باقی می‌مانند.

۲. انتقال جرم بالا: سطح تماس بسیار زیاد نانوحباب‌ها با آب، باعث انتقال بسیار مؤثر گاز (اکسیژن، ازن، هیدروژن و ...) به آب می‌شود.

۳. تولید رادیکال‌های آزاد: نانوحباب‌ها می‌توانند در اثر فروپاشی، رادیکال‌های هیدروکسیل ($\text{OH}^\bullet$) و سایر گونه‌های اکسیژن فعال یا ROS تولید کنند که خاصیت ضد عفونی‌کنندگی دارند.

۴. بار سطحی قابل تنظیم: بار الکتریکی سطح نانوحباب‌ها را می‌توان با تغییر pH یا افزودن مواد شیمیایی تنظیم کرد.



شکل ۱: تأثیرات کلی نانوحباب‌ها بر آبی پروری

فصل دوم: نانوحباب برای افزایش تولید و برداشت در آبی پروری

نانوحباب یکی از فناوری‌های نوظهور و بسیار مهم در آبی پروری است، زیرا می‌تواند اکسیژن را با راندمان بالا در آب حل کند، کیفیت آب را پایدار نگه دارد و در نهایت ظرفیت تولید و برداشت را افزایش دهد. شواهد و گزارش‌های

صنعتی و علمی نشان می‌دهند که این فناوری به‌ویژه در سیستم‌های پرورش ماهی و RAS می‌تواند بازده انتقال اکسیژن را بهبود دهد، آمونیاک را کاهش دهد و تلفات را کم کند.

آبزی‌پروری در دهه‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین منابع تأمین پروتئین در جهان تبدیل شده است، اما این صنعت هم‌زمان با چالش‌هایی مانند کمبود اکسیژن محلول، تجمع آمونیاک، نوسان کیفیت آب، شیوع بیماری‌ها و هزینه بالای انرژی روبه‌روست. در چنین شرایطی، هر فناوری که بتواند کیفیت محیط پرورش را پایدارتر کند، مستقیماً بر رشد، بقا و در نهایت برداشت نهایی اثر می‌گذارد. در پرورش ماهی، پایداری اکسیژن و توزیع یکنواخت آن اهمیت زیادی دارد. نانوحباب‌ها به دلیل همین ماندگاری و انتقال بهتر گاز، می‌توانند استرس را کاهش دهند، شرایط تنفسی را بهتر کنند و ظرفیت تولید را افزایش دهند.

۲.۱. افزایش تولید ماهی

مهم‌ترین اثر نانوحباب در افزایش برداشت، بهبود تأمین اکسیژن محلول است. وقتی اکسیژن به‌صورت پایدار و یکنواخت در تمام ستون آب توزیع شود، ماهی‌ها انرژی کمتری برای تنفس و سازگاری صرف می‌کنند، خوراک را بهتر مصرف می‌کنند و ضریب تبدیل غذایی بهبود می‌یابد؛ این یعنی رشد بیشتر در واحد زمان و امکان برداشت بالاتر از هر مترمکعب آب. اکسیژن محلول یا DO، یکی از حیاتی‌ترین پارامترها در پرورش ماهی است. کاهش اکسیژن محلول باعث کاهش رشد و افزایش تلفات، تضعیف سیستم ایمنی و افزایش حساسیت به بیماری‌ها می‌شود.

جدول ۲: نتایج تحقیقات انجام شده در خصوص اثر نانوحباب هوا در پرورش ماهی

نوع ماهی	نوع نانوحباب	نتیجه
ماهی آبیو Plecoglossus altivelis	هوا	افزایش ۱۰۶ برابری وزن نهایی
قزل‌آلای رنگین کمان (Rainbow trout)	هوا	افزایش ۱۰۱۴ برابری وزن نهایی
تیلاپیا (Nile tilapia)	هوا	افزایش گلبول‌های قرمز و سفید خون (نشان‌دهنده سلامت بیشتر)
ماهی هامور (Grouper)	هوا	افزایش معنی‌دار وزن نهایی، نرخ رشد ویژه و بهره‌وری

محققان ژاپنی (Ebina et al., 2013) نیز با استفاده از نانوحباب هوا در سیستم پرورش، موفق به افزایش اکسیژن محلول در دسترس ماهی شدند و در نتایج نهایی ایشان، وزن نهایی ماهی آبیو ۱۲۷ درصد بیشتر از گروه شاهد و وزن نهایی قزل‌آلای رنگین کمان ۳۷ درصد بیشتر از گروه شاهد شد.

نکته مهم درخصوص استفاده از نانوحباب هوا این است که برخلاف اشباع بیش از حد اکسیژن یا نیتروژن در زمانی که این گازها تحت فشار در آب حل شده باشند و باعث بیماری حباب گازی در ماهی می‌شوند، در مطالعات ثبت شده، استفاده از نانوحباب هوا با اینکه ۷۸ درصد هوا را نیتروژن تشکیل داده است، هیچ عارضه جانبی در ماهی ایجاد نکرده است.

نانوحباب‌ها فقط یک ابزار هوادهی نیستند؛ آن‌ها محیط زیست کل سیستم را بهبود می‌دهند. در برخی منابع، بر نقش آن‌ها در تولید گونه‌های فعال اکسیژن و کمک به کاهش بار میکروبی و عوامل بیماری‌زا اشاره شده است، هرچند شدت این اثر بسته به نوع گاز، دوز، طراحی سیستم و شرایط آب متغیر است که در ادامه شرح داده خواهد شد.

در گزارش‌های منتشرشده از کارگاه‌ها و تجربه‌های میدانی، به ایجاد شرایط فوق‌اشباع اکسیژن، توزیع یکنواخت اکسیژن و بهبود کیفیت آب به‌عنوان مزیت‌های کلیدی نانوحباب اشاره شده است. همین عوامل باعث کاهش تلفات و افزایش تولید، به‌ویژه در شرایط بحرانی مانند قطعی برق، کاهش دبی آب یا گل‌آلودگی ناشی از سیلاب می‌شود.

۲.۲. تأثیر بر میکروبیوم روده آبزیان

نانوحباب‌ها بسته به نوع گاز و شرایط مصرف می‌توانند میکروبیوم روده ماهی و میگو را به‌صورت غیرمستقیم تغییر دهند؛ در مطالعات انجام شده در سرتاسر جهان، نانوحباب اکسیژن عموماً اثرات خنثی تا مفید بر تنوع میکروبی روده نشان داده، در حالی که نانوحباب ازن بیشتر با کاهش باکتری‌های فرصت‌طلب و تغییر ترکیب میکروبی همراه بوده است.

مکانیسم‌های اصلی اثر نانوحباب بر میکروب‌های روده به صورت زیر است:

۱- افزایش اکسیژن محلول آب و محیط روده که آب را به سمت شرایط پایدارتر می‌برد و می‌تواند به نفع باکتری‌های مفید و پایداری اکوسیستم روده باشد.

۲- کاهش بار میکروب‌های غیرمفید محیط به‌ویژه در نانوحباب ازن، به علت خاصیت اکسیدکنندگی، تعداد باکتری‌های بیماری‌زا یا فرصت‌طلب در آب و گاهی در روده کاهش می‌یابد.

۳- نانوحباب‌ها با کاهش استرس و بهبود سلامت میزبان، باعث تغییر میکروبیوم روده می‌شوند. وقتی ماهی یا میگو استرس کمتری دارد، ترکیب میکروبیوم روده هم معمولاً پایدارتر می‌شود.

در کل اگر هدف حفظ تعادل میکروبیوم و بهبود سلامت عمومی باشد، نانوحباب اکسیژن معمولاً گزینه ملایم‌تر و ایمن‌تری است و اگر هدف کاهش بار عوامل بیماری‌زا، مخصوصاً *Vibrio* باشد، نانوحباب ازن در آب، شمار باکتری‌ها را سریع‌تر از نانوحباب اکسیژن پایین می‌آورد و برای کنترل بار میکروب‌های غیر مفید مؤثرتر است ولی

باید ملاحظات استفاده از ازن در آبرزی پروری را رعایت نمود و دوز، زمان تماس و گونه پرورشی با دقت بیشتری مدیریت شود تا به میکروبیوم مفید آسیب نرزد.

Xu و همکاران در سال ۲۰۲۲ نشان دادند که نانوحباب هوا باعث افزایش باکتری‌های مفید در روده میگو شده که این تغییرات میکروبی باعث کاهش نیاز به آنتی‌بیوتیک‌ها و کاهش خطر بیماری شده است که در این خصوص در فصل چهارم به شکل گسترده بحث خواهد شد.

۲.۳. ارزیابی اقتصادی

ارزیابی اقتصادی استفاده از فناوری نانوحباب در پرورش آبزیان نشان می‌دهد که این فناوری، با کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش تولید قابل فروش، در بسیاری از سناریوها دارای دوره بازگشت سرمایه کوتاه و نرخ سود مناسبی است و می‌تواند جایگزین توسعه فیزیکی مزارع برای افزایش تولید باشد. باید در نظر داشت که افزایش برداشت فقط به معنی رشد سریع‌تر نیست؛ بلکه باید به معنی کاهش تلفات، مصرف بهینه خوراک (کاهش FCR)، استفاده بهتر از آب و انرژی، امکان افزایش تراکم در واحد حجم، کاهش استرس، کاهش هزینه‌های درمان و اصلاح کیفیت آب نیز باشد. بر اساس گزارش‌های منتشرشده، استفاده از فناوری نانوحباب می‌تواند امکان افزایش چشمگیر تولید سالانه را میسر نماید. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از نانوحباب در پرورش آبزیان از نظر اقتصادی بسیار مقرون‌به‌صرفه است. نانوحباب نه تنها باعث افزایش بهره‌وری می‌شود، بلکه از نظر اقتصادی نیز بسیار توجیه‌پذیر است که در ذیل به تفصیل آورده شده است.

به‌طور کلی، ارزش اقتصادی سیستم نانوحباب زمانی محقق می‌شود که صرفه‌جویی در هزینه‌ها و افزایش درآمد ناشی از تولید بیشتر، از هزینه خرید، نصب و بهره‌برداری سامانه‌های نانوحباب پیشی بگیرد و در بازه‌ای منطقی (مثلاً کمتر از ۲-۳ سال) بازگشت سرمایه حاصل شود.

بر اساس گزارش پایگاه خبری فناوری نانو ایران، مقایسه کلان در سطح ملی نشان می‌دهد که اگر هدف، دو برابر کردن تولید آبزیان باشد، توسعه فیزیکی مزارع (دو برابر کردن تعداد استخرها) نیازمند سرمایه‌گذاری کلانی است، در حالی که استفاده از سامانه نانوحباب برای رسیدن به همان افزایش تولید، تنها به حدود ۲۰ درصد آن سرمایه‌گذاری نیاز دارد. این نسبت، نشان‌دهنده جذابیت اقتصاد کلان نانوحباب به‌عنوان جایگزین توسعه فیزیکی است.

در بسیاری از مزارع که از اکسیژن خالص استفاده می کنند، هزینه اکسیژن یکی از بزرگ ترین هزینه های جاری است. مطالعه موردی شرکت Trident Bubble Technologies نشان می دهد که نصب سیستم نانوحباب در تانک های ۴۰ و ۸۰ مترمکعبی، مصرف اکسیژن را حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد نسبت به سیستم میکرو حباب یا سیستم مخروط اکسیژن کاهش داده است؛ به گونه ای که مصرف در تانک ۴۰ مترمکعبی از حدود ۱۰-۱۵ لیتر در دقیقه به ۵ لیتر در دقیقه و در تانک ۸۰ مترمکعبی از بیش از ۲۵ لیتر در دقیقه به ۱۰ لیتر در دقیقه رسیده است. این کاهش مصرف، به طور مستقیم هزینه خرید اکسیژن را کم می کند و در سودآوری مزرعه اثر قابل توجهی دارد.

نمونه سیستم نانوحباب غوطه ور Freya در مزارع سالمون نروژ و شیلی نشان داده است که مصرف اکسیژن تا ۴۱ درصد و مصرف انرژی مرتبط با اکسیژن رسانی تا ۶۰ درصد کاهش می یابد، در حالی که راندمان انتقال اکسیژن بیش از ۸۵ درصد است. این ارقام نشان می دهد که نانوحباب، علاوه بر کاهش هزینه اکسیژن، بار مصرف انرژی پمپ ها و کمپرسورهای هوادهی را نیز کاهش می دهد و در نتیجه هزینه های جاری انرژی را پایین می آورد.

نانوحباب های اکسیژن و ازن با کاهش بار میکروبی و بهبود کیفیت آب، نیاز به مصرف آنتی بیوتیک ها، مواد ضد عفونی کننده و داروهای درمانی را کاهش می دهند. گزارش های میدانی در سامانه های مدار بسته یا RAS نشان می دهد که با استفاده از نانوحباب، شاخص های BOD، کدورت و آمونیاک کاهش یافته و تلفات ناشی از بیماری کاهش می یابد که به طور غیرمستقیم هزینه درمان و تلفات را کاهش می دهد.

یکی از مهم ترین شاخص های اقتصادی در آبرزی پروری، ضریب تبدیل غذایی یا FCR است، یعنی نسبت مقدار خوراک مصرفی به وزن زنده تولیدی. مطالعات میدانی گزارش شده در منابع ایرانی نشان می دهند که با استفاده از نانوحباب اکسیژن، FCR در برخی مزارع از حدود ۱.۶ به ۱.۰ تا ۱.۱ کاهش یافته است، که به معنای صرفه جویی ۲۰ تا ۳۰ درصدی در هزینه خوراک است. از آنجا که خوراک معمولاً بزرگ ترین سهم را در هزینه های جاری دارد، کاهش FCR مستقیماً حاشیه سود را افزایش می دهد.

افزون بر این، نانوحباب با افزایش اکسیژن محلول و کاهش استرس، رشد روزانه ماهی را افزایش می دهد؛ در برخی گزارش ها رشد روزانه از حدود ۱.۱ درصد به ۱.۵ درصد رسیده است. این افزایش رشد باعث می شود زمان رسیدن به وزن بازاری کاهش یابد، که دو پیامد اقتصادی دارد: گردش سریع تر سرمایه و کاهش مدت زمان در معرض ریسک (بیماری، نوسان قیمت و...). در پرورش میگو نیز گزارش شده است که نانوحباب ها می توانند دوره پرورش را حدود ۱۰ تا ۱۵ روز کاهش دهند و نرخ بقا را تا حدود ۹۵ درصد در مرحله پست لاروی افزایش دهند.

از منظر درآمد، مزیت اصلی نانوحباب در امکان افزایش تراکم بدون کاهش نرخ بقا و کیفیت محصول است. در برخی مزارع داخلی، استفاده از سامانه نانوحباب در پرورش ماهی منجر به افزایش تراکم تا دو برابر شده است؛ این افزایش تولید، با فرض ثابت بودن سطح و زیرساخت فیزیکی، عملاً دو برابر شدن درآمد بالقوه از فروش محصول را به دنبال دارد.

۲.۴. دوره بازگشت سرمایه (ROI):

بر اساس یک تحلیل ارائه شده در یک مقاله علمی در سال ۲۰۲۵، دوره بازگشت سرمایه برای دستگاه نانوحباب در سامانه مدار بسته RAS حدود ۷ تا ۹ ماه گزارش شده است. این تحلیل با در نظر گرفتن افزایش رشد روزانه، کاهش FCR، صرفه جویی در آب، دارو و ضد عفونی و افزایش تولید خالص انجام شده است. بدین معنی که سرمایه گذاری اولیه برای یک دستگاه نانوحباب ساز، در یک دوره برداشت (یک سیکل پرورش) می تواند از محل افزایش سود عملیاتی بازگردد.

از منظر ROI (نرخ بازده سرمایه گذاری)، اگر صرفه جویی خوراک و اکسیژن و افزایش وزن قابل فروش به گونه ای باشد که مثلاً سود خالص مزرعه ۲۰ تا ۳۰ درصد نسبت به حالت بدون نانوحباب افزایش یابد، ROI سالانه این فناوری می تواند بسیار مناسب باشد، خصوصاً در سیستم های متراکم و مدار بسته که اثر نانوحباب بیشتر از سیستم های گسترده و نیمه متراکم است.

فصل سوم: نانوحباب برای تصفیه فاضلاب آبی پروری

مجموع شواهد موجود نشان می دهند که نانوحباب ها می توانند به عنوان یک فناوری مکمل در تصفیه فاضلاب آبی پروری، کارایی حذف مواد آلی، نیتروژن و فسفر را افزایش دهند، پاتوژن ها را کاهش دهند و با بهبود هوادهی، شرایط را برای فرایندهای بیولوژیکی و بازاستفاده از پساب در آبی پروری، مطلوب تر کنند.

چالش های فاضلاب آبی پروری

فاضلاب آبی پروری حاوی موارد زیر است:

- نیتروژن کل و فسفر: باعث اتریفیکاسیون (غنی شدن) آب های پذیرنده می شود.
- مواد آلی محلول: باعث کاهش اکسیژن و رشد جلبک های مضر می شود.

- داروها و آنتی‌بیوتیک‌ها: باعث ایجاد مقاومت آنتی‌بیوتیکی در محیط می‌شود.

- مواد معلق: باعث کدورت و کاهش کیفیت آب می‌شود.

در یک مطالعه تجربی توسط یانگ و همکاران (۲۰۲۴) سیستم تصفیه پساب آبی‌پروری را با ترکیب نانوحباب ازن و جلبک *Nannochloropsis oculata* آزمایش کردند و گزارش دادند که این ترکیب اثرات خالص‌سازی بسیار بالایی دارد و حذف COD، نیتروژن کل و فسفر کل را حدود ۸۰ درصد می‌رساند. در این مطالعه، جلبک نقش اصلی را در تصفیه داشت، اما نانوحباب ازن با تغییر دینامیک مواد مغذی و تأثیر بر جوامع باکتریایی، راندمان حذف نیتروژن و فسفر را بهبود بخشید.

کنترل جلبک‌های آب شیرین با نانوحباب ازن، راهکاری نوین برای بهبود کیفیت آب در استخرهای پرورش ماهی به شمار می‌آید. رشد بیش از حد جلبک‌ها در سیستم‌های آبی‌پروری می‌تواند برای آبزیان بسیار مضر باشد و باعث کاهش شدید اکسیژن محلول در شب (به دلیل تنفس جلبک‌ها)، نوسانات شدید pH (به دلیل تغییرات دی‌اکسید کربن)، تولید سموم توسط برخی گونه‌های جلبکی (مانند سیانوباکتری‌ها) و مرگ و میر گسترده آبزیان شود.

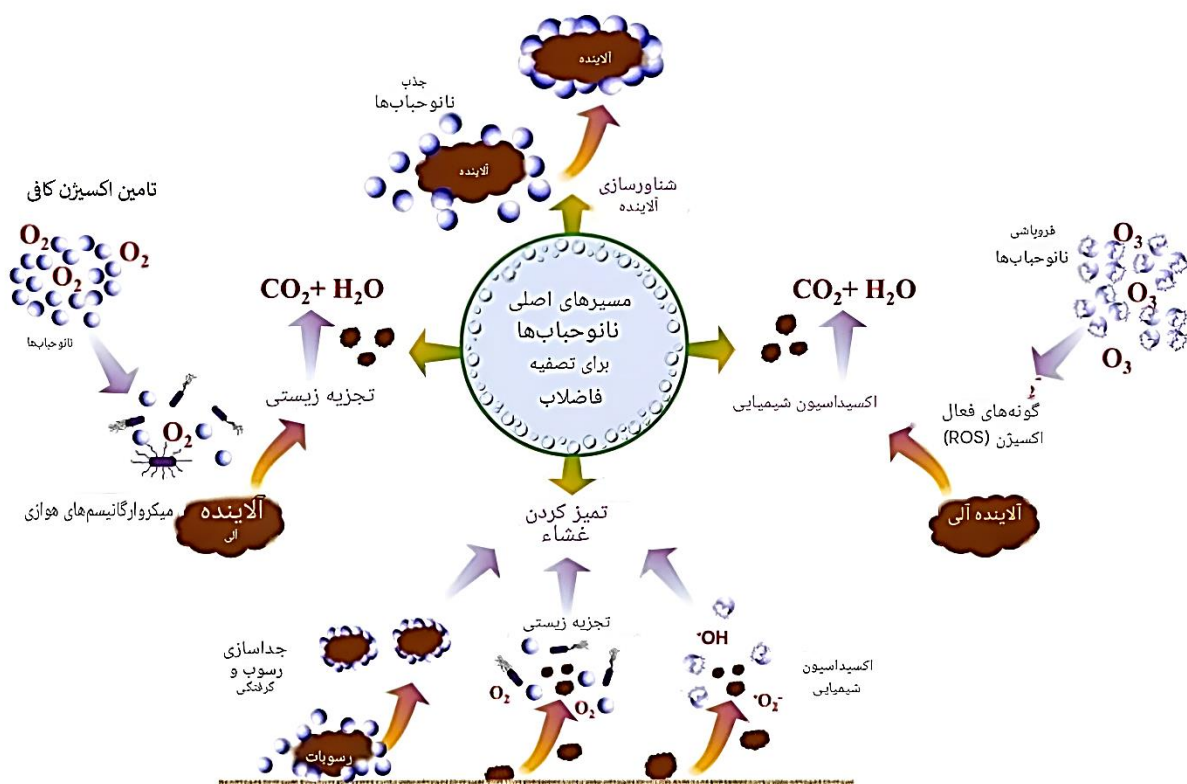
روش‌های سنتی کنترل جلبک، مانند استفاده از سولفات مس، اگرچه مؤثر هستند، اما معایب قابل توجهی دارند مثلاً تجمع مس در زنجیره غذایی و خاک، سمیت برای آبزیان (به‌ویژه سخت‌پوستان) و آلودگی محیط زیست

در سال‌های اخیر، فناوری ازن به‌عنوان یک روش جایگزین و سازگار با محیط زیست برای کنترل جلبک‌ها مطرح شده است.

جدول ۳: مقایسه انواع روش‌های کنترل جلبک در استخرهای پرورش ماهی

روش	مزایا	معایب
سولفات مس	ارزان، مؤثر	تجمع در محیط، سمیت برای آبزیان، غیرقابل استفاده در استخرهای پرورش میگو
پراکسید هیدروژن	تجزیه به آب و اکسیژن	عمدتاً علیه سیانوباکتری‌ها مؤثر است، نه همه جلبک‌ها
اولتراسونیک (فراصوت)	بدون مواد شیمیایی	نیاز به عمق کافی آب (بیش از ۱-۰٫۸ متر)، هزینه بالا
ازن (O_3)	مؤثر، تجزیه به اکسیژن که برای آبزی پروری مفید است، بدون باقیمانده	نیاز به تجهیزات، غلظت بالا سمی است

Him Ng و همکاران در سال ۲۰۲۳ یک مطالعه مقایسه‌ای در خصوص تاثیر هوادهی، نانوحباب هوا و نانوحباب ازن بر روی میزان جلبک‌ها در آب پرورش ماهی کشور هنگ کنگ انجام دادند. در نتایج مطالعه ایشان، استفاده از هوادهی و نانوحباب هوا باعث افزایش میزان جلبک‌ها شده بود و میزان اکسیژن آب نیز تغییر زیادی نداشت ولی استفاده از نانوحباب ازن باعث کاهش شدید حدوداً ۹۶ درصدی جلبک‌ها و افزایش ۱۹۶ درصدی اکسیژن آب شده بود.



شکل ۲: نقش‌های بالقوه نانوحباب‌ها در تصفیه فاضلاب

۳.۱. تخریب آنتی‌بیوتیک‌ها با نانوحباب

آنتی‌بیوتیک‌ها از جمله آلاینده‌های نوظهور در آب‌های سطحی، زیرزمینی و فاضلاب‌ها هستند که از راه‌های مختلفی مانند پساب بیمارستان‌ها، فاضلاب خانگی و به‌ویژه فاضلاب واحدهای دامداری و آبریز پروری وارد محیط می‌شوند. حضور این ترکیبات حتی در غلظت‌های پایین می‌تواند منجر به ایجاد مقاومت آنتی‌بیوتیکی در باکتری‌ها، اختلال در اکوسیستم‌های آبی و خطرات بالقوه برای سلامت انسان شود. روش‌های متداول تصفیه بیولوژیکی اغلب در حذف کامل این ترکیبات ناتوان‌اند، بنابراین نیاز به فرایندهای پیش‌تصفیه یا تصفیه تکمیلی مانند اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) احساس می‌شود. نانوحباب‌ها، به‌ویژه نانوحباب‌های ازن، به‌عنوان یک فناوری پیش‌اکسیداسیون مؤثر برای تخریب آنتی‌بیوتیک‌ها در آب و فاضلاب شناخته می‌شوند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که سیستم‌های مبتنی بر نانوحباب ازن می‌توانند آنتی‌بیوتیک‌هایی مانند تتراسایکلین و اکسی‌تتراسایکلین را با راندمان بالا و در زمان کوتاه تجزیه کنند و سمیت آن‌ها را کاهش دهند. نانوحباب‌ها کارایی انتقال جرم ازن به آب را افزایش می‌دهند و در لحظه

فروپاشی، گونه‌های فعال اکسیژن یا ROS مانند رادیکال هیدروکسیل (OH^-) و سوپراکسید و حتی اکسیژن رادیکال تولید می‌کنند که عامل اصلی تخریب آلاینده‌های آلی پایدار از جمله آنتی‌بیوتیک‌هاست. نانوحباب‌های ازن به عنوان یک گزینه برای ضد عفونی و بهبود کیفیت آب معرفی شده‌اند. ازن به خودی خود اکسید کننده قوی است، اما در قالب نانوحباب زمان تماس بیشتر و انتقال جرم بالاتری پیدا می‌کند و این موضوع راندمان تصفیه و گندزدایی را افزایش می‌دهد. مطالعات نشان داده‌اند که علاوه بر حذف خود آنتی‌بیوتیک، سمیت پساب و غلظت محصولات میانی خطرناک نیز کاهش می‌یابد.

۳.۲. تأثیر بر گرفتگی غشا:

گزارش‌های مروری نشان می‌دهند که نانوحباب‌ها در تصفیه آب و فاضلاب به عنوان یک فناوری سبز، هم برای بهبود کیفیت آب و هم برای کاهش گرفتگی تجهیزات (از جمله غشاها) کاربرد دارند. در سیستم‌های تصفیه و بازچرخانی آب آبرزی پروری (مانند سیستم RAS)، گرفتگی غشاء میکروفیلترها، یکی از محدودیت‌های اصلی است که باعث کاهش راندمان و افزایش هزینه‌هاست. حضور مواد آلی، کلوئیدها، ذرات معلق و بیوفیلیم‌ها که همگی ناشی از فضولات ماهی هستند، باعث مسدود شدن غشاء میکروفیلتر می‌شوند. وجود نانوحباب‌ها در آب می‌تواند بار کلوئیدی و معلق ورودی به غشا را کاهش دهد، تشکیل بیوفیلیم و رسوب‌های آلی/غیرآلی روی سطح غشا را کندتر کند و پایداری عملکرد غشا را در طول زمان افزایش و هزینه‌های عملیاتی (شست‌وشو، توقف، تعویض غشا) را کم کند. نانوحباب‌ها با ایجاد جریان تلاطمی و نیروی برشی روی سطح غشاء، از چسبیدن آلاینده‌ها جلوگیری کرده و عمر غشا را افزایش می‌دهند.



شکل ۳: کاهش گرفتگی غشا با نانوحباب

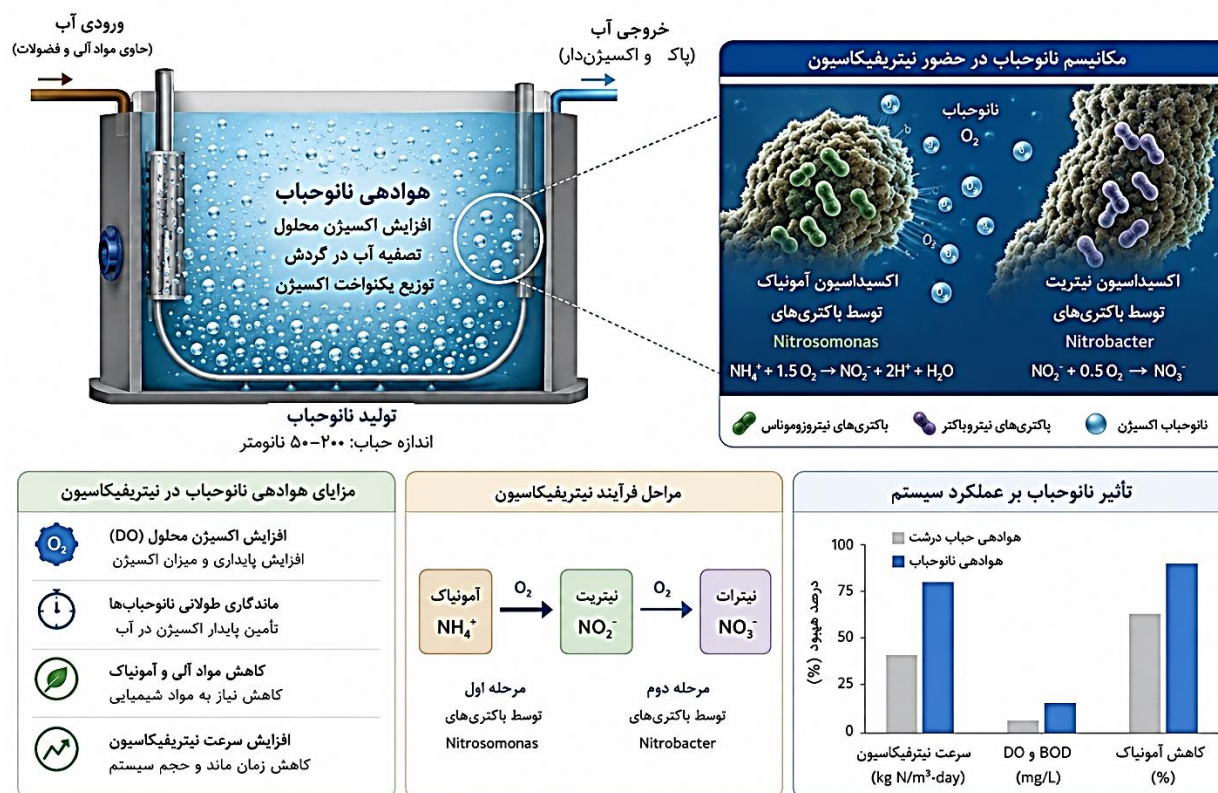
۳.۳. حذف آمونیاک، نیتريت و نیترات با نانوحباب

در سیستم‌های پرورش آبزیان، آمونیاک عمدتاً از تجزیه فضولات ماهی و غذای مصرف نشده تولید می‌شود. آمونیاک (به‌ویژه فرم غیر یونیزه NH_3) برای ماهی‌ها بسیار سمی است و باعث استرس تنفسی، کاهش رشد، آسیب بافتی و در غلظت‌های بالا باعث تلفات می‌شود. نیتريت نیز از واسطه‌های چرخه نیتروژن است و بسیار سمی است، در حالی که نیترات معمولاً سمیت کمتری دارد اما در غلظت‌های بالا می‌تواند باعث استرس مزمن، کاهش کیفیت آب و مشکلات مدیریتی شود.

کنترل این ترکیبات معمولاً بر پایه نیتریفیکاسیون (تبدیل آمونیاک به نیتريت و نیترات توسط باکتری‌های نیتریفایر) و در برخی موارد دنتریفیکاسیون (تبدیل نیترات به گاز نیتروژن) انجام می‌شود. هر فناوری که بتواند این فرایندهای زیستی را تقویت یا تسهیل کند، می‌تواند به کاهش بار نیتروژنی کمک کند.

نانوحباب‌ها (به‌ویژه نانوحباب‌های هوا، اکسیژن و ازن) می‌توانند به‌عنوان یک فناوری مکمل در حذف آمونیاک، نیتريت و نترات از آب و فاضلاب آبی‌پروری عمل کنند. گزارش‌های میدانی و مرورهای فنی نشان می‌دهند که استفاده از این فناوری نه‌تنها اکسیژن محلول را افزایش می‌دهد، بلکه می‌تواند غلظت آمونیاک و ترکیبات نیتروژنی را تا حد زیادی کاهش دهد و کیفیت آب را برای پرورش ماهی بهبود بخشد.

چندین گزارش فنی و میدانی در ایران نشان داده‌اند که استفاده از دستگاه‌های نانوحباب در استخرهای پرورش ماهی توانسته هم‌زمان اکسیژن محلول را تأمین و میزان آمونیاک را تا حد زیادی کاهش دهد. در یک گزارش بررسی کاربرد نانوحباب در ماهیان خاویاری و قزل‌آلا، عنوان شده که این فناوری توانسته اکسیژن محلول را تأمین و آمونیاک را تا حد زیادی کاهش دهد؛ این موضوع برای افزایش بقا و رشد اهمیت مستقیم دارد، چون آمونیاک بالا یکی از عوامل کاهش اشتها، بروز استرس و افزایش تلفات است. آمونیاک و نیتريت، سمی‌ترین ترکیبات نیتروژنی برای آبزیان هستند. نانوحباب‌ها با افزایش اکسیژن محلول، فرآیند نیتریفیکاسیون (تبدیل آمونیاک به نترات توسط باکتری‌ها) را تسریع می‌کنند.



شکل ۴: عملکرد نیتریفیکاسیون با هوادهی نانوحباب

۳.۴. حذف آمونیاک در سیستم RAS

در سیستم‌های آبرزی پروری با گردش آب (RAS)، حذف کارآمد آمونیاک حیاتی است، زیرا آمونیاک غیر یونیزه (NH_3) حتی در غلظت‌های پایین برای ماهیان سمی است و می‌تواند باعث کاهش رشد، استرس فیزیولوژیک و تلفات شود. در ادامه، منابع تولید آمونیاک، مکانیسم‌های حذف و راهکارهای عملی در RAS بر اساس منابع علمی مرور می‌شود.

منابع تولید آمونیاک در RAS منبع اصلی آمونیاک در سیستم‌های آبرزی پروری، دفع نیتروژنی آبزیان است؛ ماهیان برای کسب انرژی و تولید بافت، پروتئین‌ها و اسیدهای آمینه را متابولیزه کرده و آمونیاک را از طریق آبشش‌ها و فضولات دفع می‌کنند. علاوه بر این، تجزیه باقیمانده خوراک و مواد آلی معلق نیز به تولید آمونیاک (NH_3) و یون آمونیوم (NH_4^+) منجر می‌شود. در سیستم‌های مدار بسته با تراکم بالا، این بار نیتروژنی می‌تواند به سرعت تجمع یابد و در صورت عدم مدیریت، کیفیت آب را به شدت تخریب کند.

فرم‌های آمونیاک و سمیت آمونیاک در آب به دو فرم وجود دارد:

آمونیاک غیر یونیزه (NH_3) فرم سمی و بسیار خطرناک برای آبزیان که به راحتی از غشاهای سلولی عبور کرده و باعث اختلالات متابولیک و تنفسی می‌شود.

یون آمونیوم (NH_4^+) فرم یونیزه که نسبتاً سمیت کمتری دارد.

نسبت NH_3 به NH_4^+ به pH و دمای آب بستگی دارد؛ با افزایش pH و دما، سهم NH_3 سمی افزایش می‌یابد. بنابراین، کنترل pH و دما در کنار حذف آمونیاک، برای کاهش سمیت ضروری است.

مکانیسم‌های اصلی حذف آمونیاک در RAS:

۱. فیلتراسیون بیولوژیکی (نیتریفیکاسیون) اصلی‌ترین روش حذف آمونیاک در RAS، فرآیند نیتریفیکاسیون در فیلترهای بیولوژیکی است. در این فرآیند، باکتری‌های نیتريت‌ساز (مانند نیتروزوموناس) آمونیاک را به نیتريت (NO_2^-) و سپس باکتری‌های نیترات‌ساز (مانند نیتروباکتر) نیتريت را به نیترات (NO_3^-) اکسید می‌کنند. نیترات سمیت بسیار کمتری نسبت به آمونیاک و نیتريت دارد و برای ماهیان قابل تحمل‌تر است.

شرایط بهینه برای نیتریفیکاسیون عبارتند از:

اکسیژن محلول کافی: میزان اکسیژن در ورودی فیلتر بیولوژیکی باید حدود ۵-۶ میلی گرم بر لیتر باشد تا باکتری‌های هوازی به خوبی فعالیت کنند.

pH قلیایی ملایم pH: آب باید کمی بیش از ۷ (به سمت قلیایی) باشد تا فعالیت باکتری‌های نیتريت ساز و نترات ساز بهینه شود.

سطح کافی مدیا: فیلترهای بیولوژیکی باید دارای مدیای مناسب (مانند بیوبال، سنگ‌های متخلخل یا پلاستیک‌های مشبک) با سطح ویژه بالا برای چسبیدن و رشد باکتری‌ها باشند.

۲. حذف فیزیکی و مکانیکی ذرات قبل از ورود آب به فیلتر بیولوژیکی، ذرات معلق و مواد آلی باید با فیلتراسیون مکانیکی (مانند درام فیلتر) حذف شوند. این کار بار آلی ورودی به فیلتر بیولوژیکی را کاهش داده و از تجمع مواد آلی که می‌توانند به آمونیاک تبدیل شوند، جلوگیری می‌کند. همچنین، تخلیه منظم لجن و رسوبات از کف مخازن و فیلترها، از تولید ثانویه آمونیاک جلوگیری می‌کند.

۳. تبادل یونی با زئولیت: زئولیت‌ها مواد معدنی طبیعی یا مصنوعی با خاصیت تبادل یونی بالا هستند که می‌توانند یون آمونیوم (NH_4^+) را از آب جذب کنند. زئولیت کلینوپتیلولیت، به‌طور تئوری قادر است تا ۱۰ برابر وزن خود آمونیوم جذب کند و در شرایط خاص تا ۲۸۷۰ میلی گرم آمونیوم به ازای هر گرم زئولیت جذب نماید. این روش به‌ویژه در مواقع اضطراری یا برای کنترل کوتاه‌مدت آمونیوم مفید است، اما ظرفیت زئولیت محدود است و نیاز به احیا یا تعویض دوره‌ای دارد.

۴. اکسیداسیون شیمیایی با ازن ازن (O_3) یک اکسیدکننده قوی است که می‌تواند آمونیاک را به نیتريت و نترات اکسید کند. مطالعات نشان داده‌اند که ازن در حذف آمونیاک مؤثر است و آمونیاک را در مدت کوتاه‌تری نسبت به نیتريت اکسید می‌کند. به‌عنوان مثال، در یک مطالعه، به ازای حذف ۱۸ میلی گرم بر لیتر آمونیاک با ازن‌زنی، تنها ۰.۳ میلی گرم بر لیتر نیتريت تولید شد که کمتر از ۱۷ درصد کل غلظت آمونیاک ورودی بود. با این حال، ازن‌زنی باید با دقت کنترل شود تا از تولید بیش از حد نیتريت و آسیب به آبزیان جلوگیری شود.

فناوری نانو حباب با بهبود هوا دهی، افزایش اکسیژن محلول و تسهیل اکسیداسیون مواد آلی، می‌تواند به‌طور غیرمستقیم به حذف آمونیاک کمک کند. نانو حباب‌ها با افزایش راندمان انتقال اکسیژن، فعالیت باکتری‌های نیتريت ساز و نترات ساز را در فیلترهای بیولوژیکی تقویت کرده و فرآیند نیتريфикаسیون را تسريع می‌کنند. همچنین، نانو حباب‌های

ازن با اکسید کردن مستقیم آمونیاک و کاهش بار میکروبی، می‌توانند به کاهش غلظت آمونیاک در آب کمک کنند. گزارش‌های پایلوت نشان می‌دهند که استفاده از نانوحباب منجر به کاهش آمونیاک، بهبود شفافیت آب و افزایش سلامت و رشد ماهی‌ها شده است.

باید گفت که حذف کارآمد آمونیاک در سیستم‌های RAS نیازمند ترکیبی از روش‌های بیولوژیکی (نیتریفیکاسیون)، فیزیکی (فیلتراسیون مکانیکی و تبادل یونی با زئولیت)، شیمیایی (ازن‌زنی) و مدیریتی (کاهش ورودی نیتروژن، تعویض آب و پایش مداوم) است.

جدول ۴: نتیجه مطالعه Subhan و همکاران (۲۰۲۱) بر روی تاثیر استفاده از نانوحباب هوا و اکسیژن بر حذف آمونیاک از سیستم پرورش لارو گربه ماهی

نوع نانوحباب	میزان حذف آمونیاک در مدت ۴۵ دقیقه
نانوحباب هوا	۶۲ تا ۶۷ درصد
نانوحباب اکسیژن	۷۰ تا ۸۳ درصد

فصل چهارم: نانوحباب برای کنترل بیماری‌ها و بهبود سیستم ایمنی

۴.۱. کنترل باکتری‌های بیماری‌زا

عوامل بیماری‌زا (پاتوژن‌ها) یکی از اصلی‌ترین محدودیت‌های توسعه پایدار آبرزی پروری محسوب می‌شوند و سالانه خسارت‌های اقتصادی سنگینی به این صنعت وارد می‌کنند. بروز بیماری معمولاً نیازمند هم‌زمانی سه فاکتور عامل

بیماری‌زا + میزبان مستعد + محیط مساعد می‌باشد. در این میان، محیط (کیفیت آب و مدیریت مزرعه) بیشترین نقش را در فعال‌سازی یا سرکوب پاتوژن‌ها دارد.

۱. ویبریو پاراهمولیتیکوس (*Vibrio parahaemolyticus*)

Vibrio parahaemolyticus یک باکتری گرم منفی، هالوفیل و فرصت طلب است که در محیط‌های آبی پروری (به‌ویژه در پرورش میگو و ماهیان دریایی) شایع بوده و عامل مهمی در بیماری‌زایی و تلفات محسوب می‌شود. این باکتری در شرایط استرس‌زا (مانند کمبود اکسیژن، کیفیت پایین آب و تراکم بالا) به راحتی تکثیر یافته و باعث شیوع بیماری‌های گوارشی، سپتی سمی و تلفات گسترده می‌شود. کنترل مؤثر این باکتری، به‌ویژه در سیستم‌های مدار بسته (RAS) و پرورش میگو، برای کاهش تلفات و نیاز به آنتی‌بیوتیک‌ها حیاتی است.

نانوحباب‌های اکسیژن با اکسید کردن مواد آلی (باقی‌مانده خوراک، فضولات و ذرات معلق)، بار آلی و مواد مغذی مورد نیاز برای رشد *Vibrio* را کاهش می‌دهند. این اثر، محیط را برای تکثیر باکتری نامناسب کرده و به‌طور غیرمستقیم جمعیت *Vibrio parahaemolyticus* را محدود می‌کند.

گزارش‌های میدانی از مزارع پرورش ماهی و میگو که از سیستم‌های نانوحباب استفاده کرده‌اند، نشان می‌دهند که این فناوری منجر به کاهش چشمگیر تلفات، بهبود رشد و کاهش نیاز به مصرف آنتی‌بیوتیک‌ها شده است. در این مزارع، کاهش بار میکروبی آب، بهبود کیفیت آب و افزایش اکسیژن محلول گزارش شده است که منجر به کاهش شیوع بیماری‌های باکتریایی (از جمله ویبریوز) شده است.

جدول ۵: نتایج مطالعات انجام شده در خصوص تاثیر انواع نانوحباب بر حذف باکتری‌های مضر در استخر پرورش ماهی

نوع نانوحباب	زمان	درصد حذف باکتری
نانوحباب اکسیژن	۷ روز	۳۱
نانوحباب هوا	۷ روز	۵۴
نانوحباب ازن	۱ دقیقه	۹۹,۹۹

۲. آرومونا س هیدروفیلا (*Aeromonas hydrophila*)

Aeromonas hydrophila یک باکتری گرم منفی، هوازی-بی‌هوازی اختیاری و فرصت طلب است که در محیط‌های آبی پروری (به‌ویژه در پرورش ماهیان گرم‌آبی و سردآبی) شایع بوده و عامل مهمی در بیماری‌زایی و تلفات محسوب می‌شود. این باکتری در شرایط استرس‌زا (مانند کمبود اکسیژن، کیفیت پایین آب، تراکم بالا و تغییرات دمایی) به راحتی تکثیر یافته و باعث شیوع بیماری‌هایی مانند سپتی‌سمی هموراژیک، زخم‌های پوستی، پوسیدگی باله و تلفات گسترده می‌شود. کنترل مؤثر این باکتری، به‌ویژه در سیستم‌های مدار بسته (RAS) و تراکم بالا، برای کاهش تلفات و نیاز به آنتی‌بیوتیک‌ها حیاتی است.

افزایش DO، فعالیت سلول‌های ایمنی (مانند لکوسیت‌ها، ماکروفاژها و لنفوسیت‌ها) را در تولید آنتی‌بادی‌ها، سیتوکین‌ها و سایر مولکول‌های دفاعی کارآمدتر می‌کند و پاسخ ایمنی را در برابر *Aeromonas* تقویت می‌نماید.

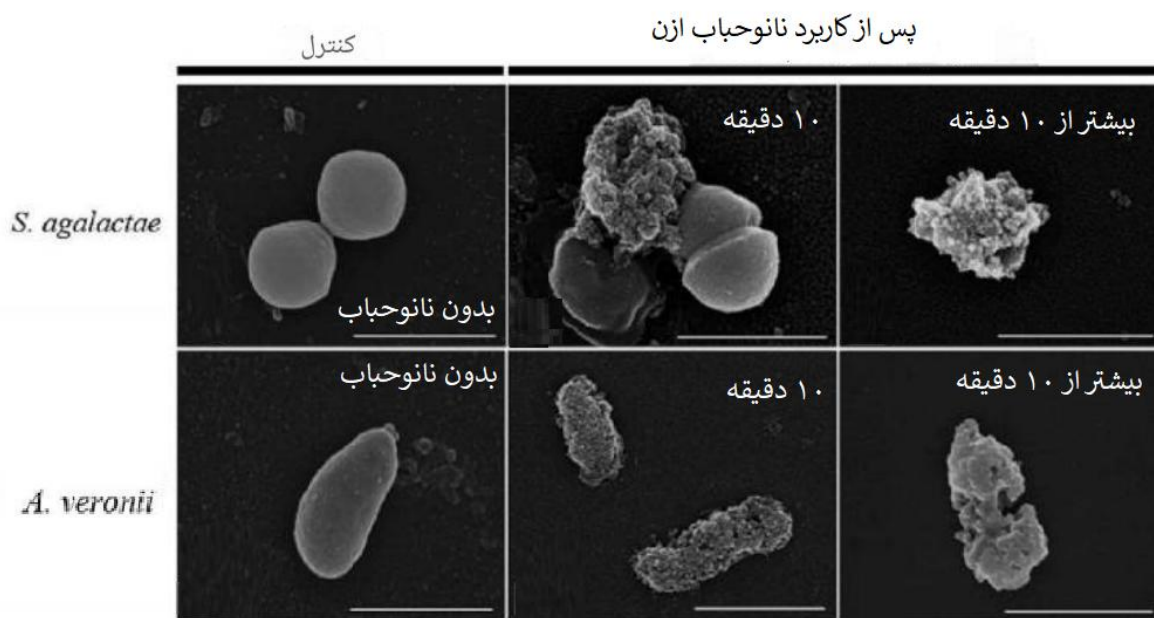
جدول ۶: نتیجه مطالعات انجام شده در خصوص تاثیر استفاده از نانوحباب بر میزان بقای ماهی تیلاپیا

تیمار	نرخ بقای ماهی تیلاپیا (درصد)
بدون نانوحباب	۱۵ تا ۲۵
با نانوحباب اکسیژن	۷۰ تا ۷۵

۳. استرپتوکوکوس آگالاکتیه (*Streptococcus agalactiae*)

این باکتری عامل تلفات گسترده در ماهی تیلاپیا است. در مطالعات انجام شده، نانوحباب ازن در ۱۰ دقیقه توانست ۹۶ درصد از باکتری *S. agalactiae* و ۹۸ درصد از باکتری *A. veronii* را حذف کند.

نکته ایمنی: تیمار ۱۰ دقیقه‌ای با نانوحباب ازن برای ماهی بی خطر بود، اما تیمار طولانی تر باعث قرمزی باله‌ها و رفتار غیرعادی شد. بنابراین، دوز و زمان دقیق بسیار مهم است.



شکل ۵: تاثیر نانوحباب ازن بر حذف باکتری‌های *S. agalactiae* و *A. veronii*

۴.۲. کنترل ویروس‌ها

کنترل ویروس‌ها در سیستم‌های پرورش آبزیان به دلیل مقاومت بالا، اندازه کوچک و عدم حساسیت به آنتی‌بیوتیک‌ها، چالش برانگیز است و نیازمند روش‌های پیشگیری و گندزدایی مؤثر می‌باشد. تأثیر انواع نانوحباب (هوا، اکسیژن و ازن) بر کنترل و حذف ویروس‌ها در آبی‌پروری، عمدتاً از طریق مکانیسم‌های مستقیم (تخریب ساختار ویروس توسط گونه‌های فعال اکسیژن و ازن) و غیرمستقیم (بهبود کیفیت آب، کاهش استرس و تقویت سیستم ایمنی میزبان) رخ می‌دهد؛ شواهد علمی و گزارش‌های میدانی نشان می‌دهند که فناوری نانوحباب می‌تواند بار ویروسی را کاهش داده و شیوع بیماری‌های ویروسی را محدود کند.

نانوحباب‌های ازن، قوی‌ترین اثر ضد ویروسی را در میان انواع نانوحباب دارند. ازن (O_3) یک اکسیدکننده قوی است که با اکسید کردن پروتئین‌های پوششی، لیپیدهای غشایی و اسیدهای نوکلئیک ویروس‌ها، آن‌ها را به‌طور مؤثر غیرفعال می‌کند. نانوحباب‌های ازن، به دلیل اندازه بسیار کوچک و سطح تماس گسترده، راندمان انتقال ازن به آب و کارایی ضد عفونی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند.

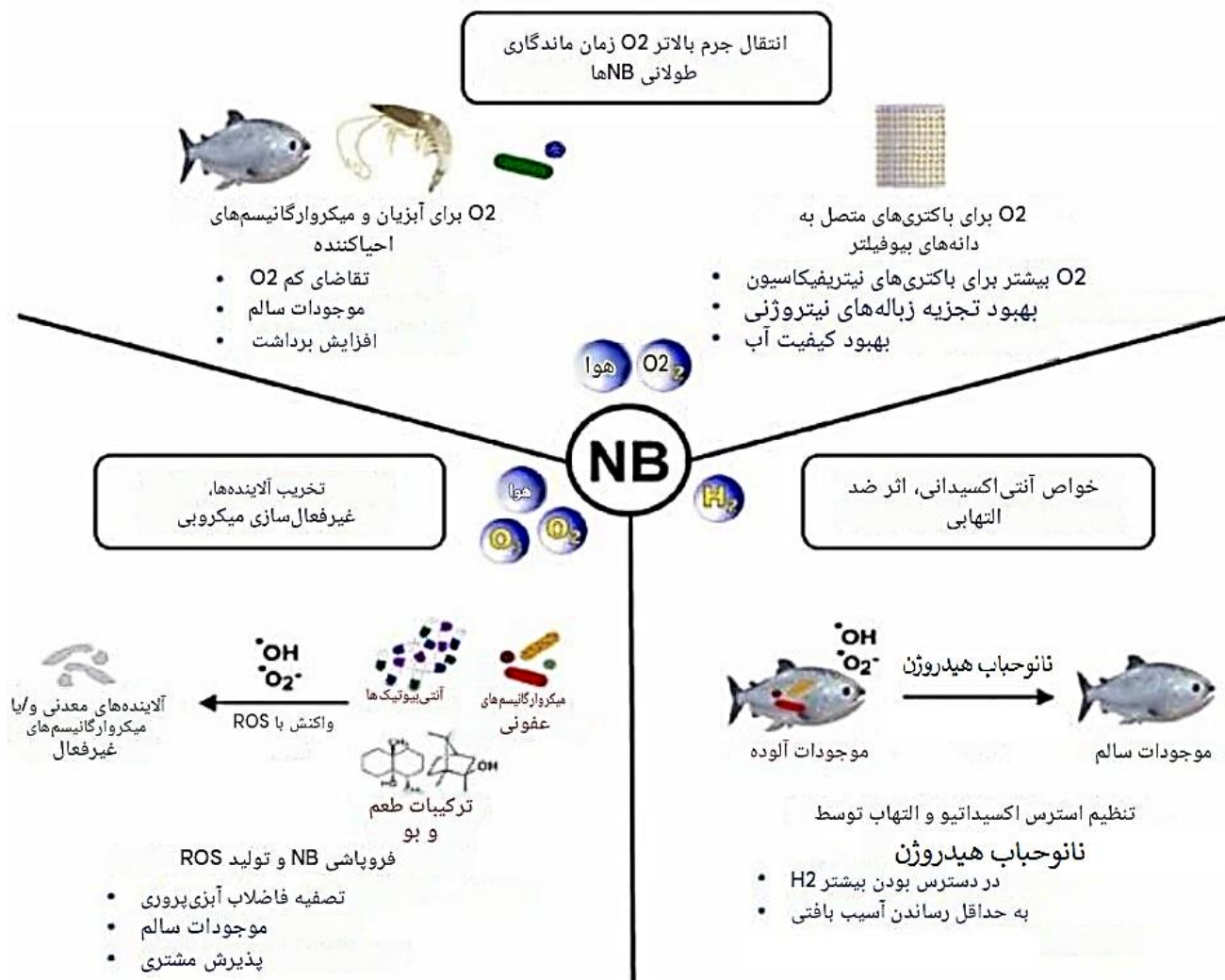
۴.۲.۱. نانوحباب هیدروژن برای کنترل ویروس SVCV

Li و همکاران در سال ۲۰۲۲، از نانوحباب هیدروژن برای کنترل ویروس SVCV (عامل بیماری ویرمی بهاره کپور) در ماهی گورخری استفاده کردند که نتیجه مطالعه ایشان در جدول شماره (۷) قید شده است.

جدول ۷: نتیجه مطالعات انجام شده در خصوص تاثیر استفاده از نانوحباب هیدروژن بر میزان بقای ماهی گورخری

نرخ مرگ و میر تا روز دهم (درصد)	تیمار
۸۰	بدون نانوحباب
۴۰ (کاهش ۵۰ درصدی)	با نانوحباب هیدروژن

مکانیسم: هیدروژن به عنوان یک آنتی اکسیدان قوی، رادیکال های آزاد مضر را خنثی کرده و از آسیب به بافت های ماهی جلوگیری می کند.



شکل ۶: آبی‌پروری پایدار با استفاده از نانونحباب‌ها

۴.۲.۲. نانونحباب اکسیژن و فازدرمانی

باکتریوفازها یا به‌اختصار فازها، ویروس‌هایی هستند که به‌طور اختصاصی باکتری‌ها را آلوده کرده و از بین می‌برند. این ویروس‌ها برای انسان، گیاه و حیوان کاملاً بی‌خطر هستند، به‌طور طبیعی در محیط (آب، خاک و بدن موجودات زنده) وجود دارند، می‌توانند به‌عنوان جایگزین آنتی‌بیوتیک‌ها برای کنترل عفونت‌های باکتریایی استفاده شوند. فازها از نظر ساختار و رفتار، شباهت زیادی به ویروس‌های بیماری‌زای حیوانات دارند، اما کشت و تکثیر آنها در آزمایشگاه آسان‌تر است، بی‌خطر هستند و نیازی به امکانات ایمنی پیشرفته ندارند.

Dien و همکاران در سال ۲۰۲۲، از نانوحباب اکسیژن برای بررسی چسبندگی فاژهای مفید به بدن ماهی استفاده نمودند و مشاهده کردند که نانوحباب اکسیژن باعث افزایش چسبندگی فاژهای درمانی به بدن ماهی می‌شود.

جدول ۸: نتیجه مطالعات انجام شده در خصوص تاثیر استفاده از نانوحباب اکسیژن بر میزان چسبندگی فاژهای درمانی به بدن ماهی

اندام	افزایش چسبندگی/جذب فاژ
مخاط پوست	تا ۲۰۴ برابر
آبشش	تا ۱۵ برابر
کبد	تا ۴ برابر

۴.۳. بهبود سیستم ایمنی با نانوحباب ازن

فناوری نانوحباب ازن با ترکیب خاصیت اکسیداتیو قوی ازن و پایداری نانوحباب‌ها در آب، به‌عنوان یک محرک غیرمستقیم سیستم ایمنی در آبزیان عمل می‌کند و با کاهش بار میکروبی، بهبود کیفیت آب و افزایش اکسیژن محلول، شرایط فیزیولوژیکی مطلوبی برای تقویت پاسخ ایمنی ماهیان فراهم می‌آورد. ازن (O_3) یک اکسیدکننده قوی و ضدعفونی‌کننده مؤثر است که توانایی بالایی در غیرفعال کردن باکتری‌ها، ویروس‌ها، قارچ‌ها و سایر عوامل عفونی دارد. در فناوری نانوحباب ازن، گاز ازن در قالب حباب‌هایی با اندازه کمتر از ۲۰۰ نانومتر (معمولاً ۵۰-۲۰۰ نانومتر) وارد آب می‌شود. این اندازه فوق‌العاده کوچک باعث می‌شود ازن به‌شکل مؤثرتری در آب حل شود، سطح تماس بسیار گسترده‌ای با آلاینده‌ها و میکروارگانیسم‌ها داشته و زمان ماندگاری طولانی‌تری در آب داشته باشد. در نتیجه، راندمان انتقال ازن به آب و کارایی ضدعفونی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

نانوحباب‌های ازن با اکسید کردن دیواره سلولی باکتری‌ها، غشای ویروس‌ها و قارچ‌ها، آن‌ها را از بین می‌برند و تعداد پاتوژن‌های بیماری‌زا را در آب به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهند. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از نانوحباب ازن می‌تواند تعداد باکتری‌های بیماری‌زا را بیش از ۹۹ درصد کاهش دهد. این کاهش بار میکروبی، احتمال تماس ماهی با عوامل بیماری‌زا را کم کرده و در نتیجه، سیستم ایمنی ماهی کمتر درگیر پاسخ‌های التهابی مداوم و خستگی ایمنی می‌شود.

نانوحباب‌های ازن با اکسید کردن مواد آلی (باقی‌مانده خوراک، فضولات ماهی و ذرات معلق)، شاخص‌های BOD، کدورت و آمونیاک را کاهش می‌دهند و کیفیت آب را بهبود می‌بخشند. آب با کیفیت بهتر، استرس اکسیداتیو و فیزیولوژیکی ماهی را کاهش می‌دهد و شرایط مناسبی برای عملکرد بهینه سیستم ایمنی فراهم می‌کند. کاهش استرس، به‌ویژه در سیستم‌های متراکم و مدار بسته، یکی از عوامل کلیدی در تقویت پاسخ ایمنی و افزایش مقاومت ماهی در برابر بیماری‌ها است.

اگرچه نانوحباب ازن به‌طور مستقیم به‌عنوان یک محرک ایمنی (مانند ایمونواستیمولانت‌های خوراکی یا واکسن‌ها) عمل نمی‌کند، اما با کاهش بار میکروبی، بهبود کیفیت آب و افزایش اکسیژن محلول، شرایط فیزیولوژیکی مطلوبی برای تقویت پاسخ ایمنی ذاتی و اکتسابی ماهی فراهم می‌کند. این اثر غیرمستقیم، باعث می‌شود سیستم ایمنی ماهی در حالت آماده‌باش بهتری قرار گیرد و در مواجهه با عوامل بیماری‌زا، پاسخ سریع‌تر و مؤثرتری نشان دهد.

پروژه‌های میدانی در مزارع پرورش ماهی که از سیستم نانوحباب گاز ازن استفاده کرده‌اند، نشان می‌دهند که این فناوری بر شاخص‌های کیفی و کمی و بهداشتی ماهی اثر مثبت دارد. در این پروژه‌ها، کاهش تعداد میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا در آب، بهبود کیفیت آب و افزایش اکسیژن محلول گزارش شده است که منجر به کاهش بیماری‌ها، تلفات و نیاز به مصرف آنتی‌بیوتیک‌ها شده است. همچنین، بهبود شرایط بهداشتی در مزارع، باعث کاهش نیاز به مصرف آنتی‌بیوتیک‌ها و تقویت سیستم ایمنی طبیعی ماهی شده است.

با وجود مزایای فوق، استفاده از نانوحباب ازن نیازمند رعایت برخی ملاحظات ایمنی و فنی مانند کنترل دقیق دوز ازن، زمان تماس مناسب، تهویه و ایمنی برای انسان و عدم تزریق مستقیم به مخزن حاوی آبزی است.

دوز زیاد ازن می‌تواند به بافتهای ظریف ماهی (به‌ویژه آبشش‌ها) آسیب برساند، زیرا ازن باقیمانده در آب سمی است. بنابراین، دوز ازن باید دقیق تنظیم شود و با تجهیزات سنجش ORP (پتانسیل اکسیداسیون و کاهش) پایش گردد.

زمان تماس ازن با آب باید کنترل شود؛ استفاده طولانی مدت یا دوز بالا می تواند باعث آسیب به آبزیان شود. استنشاق ازن گازی در مقادیر بالا برای دستگاه تنفسی انسان مضر است، بنابراین سیستم های تهویه مناسب باید در نظر گرفته شوند تا از تجمع خطرناک ازن در فضا جلوگیری شود. همچنین ازن نباید مستقیماً وارد محیط آکواریوم یا تانک حاوی ماهی یا میگو شود، بلکه باید در مرحله تصفیه و پیش از ورود به مخزن به خوبی تجزیه شده باشد تا ازن باقیمانده به حیوان آبری آسیب نرساند. رعایت این ملاحظات، ایمنی و کارایی استفاده از نانوحباب ازن را در پرورش آبزیان تضمین می کند.

کاهش بیماری ها و تلفات ماهیان با استفاده از نانوحباب ازن، به طور مستقیم سودآوری مزرعه را افزایش می دهد و هزینه های دارویی و درمانی را کاهش می دهد. همچنین، کاهش مصرف آنتی بیوتیک ها، خطر توسعه مقاومت آنتی بیوتیکی را کاهش داده و به حفظ کارایی داروها در آینده کمک می کند. از منظر زیست محیطی، نانوحباب های ازن راه حلی سازگار با محیط زیست ارائه می دهند، زیرا ازن به اکسیژن تجزیه می شود و هیچ ترکیب مضر باقی نمی گذارد. این ویژگی، نانوحباب ازن را به یک فناوری پایدار و دوستدار محیط زیست در آبرزی پروری تبدیل می کند.

Linh و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که نانوحباب ازن باعث افزایش بیان ژن های ایمنی در ماهی تیلاپیا می شود.

جدول ۹: تاثیر استفاده از نانوحباب ازن بر ژن های فعال شده ماهی تیلاپیا در مطالعه Linh و همکاران (۲۰۲۱)

نام ژن	نقش
IL-1 β	سیتو کین التهابی، فعال کننده پاسخ ایمنی
IL-2 β	سیتو کین تنظیمی، افزایش تکثیر لنفوسیت ها
TNF- α	فاکتور نکروز تومور، القا کننده پاسخ التهابی
LYZ	لیزوزیم، آنزیم ضد باکتریایی

نتایج بدست آمده شامل افزایش نرخ بقای نسبی ۶۰ تا ۷۰ درصدی در ماهی‌های پیش تیمار شده با نانوحباب ازن و کاهش زمان پاسخ ایمنی نسبت به گروه شاهد بود.

۴.۴. اثر نانوحباب بر کاهش مصرف دارو

فناوری نانوحباب با بهبود کیفیت آب، کاهش استرس و افزایش اکسیژن محلول، به‌طور غیرمستقیم و با کاهش بار میکروبی و بیماری‌ها، نیاز به مصرف آنتی‌بیوتیک‌ها و سایر داروها را در پرورش انواع ماهیان کاهش می‌دهد و راهکاری پایدار برای کاهش مصرف دارو در آبی‌پروری محسوب می‌شود.

نانوحباب‌ها هنگام فروپاشی (collapse) در آب، رادیکال‌های آزاد مانند هیدروکسیل ($\text{OH}^\cdot$) و سایر گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) تولید می‌کنند که خاصیت اکسیداتیو و ضد عفونی‌کنندگی دارند. این رادیکال‌ها قادرند دیواره سلولی باکتری‌ها، غشای ویروس‌ها و قارچ‌ها را تخریب کرده و عوامل بیماری‌زا را از بین ببرند. این فرآیند طبیعی، بدون نیاز به افزودن مواد شیمیایی یا آنتی‌بیوتیک‌ها، بار میکروبی آب و سطوح را کاهش می‌دهد و پیشگیری از بیماری‌ها را تسهیل می‌کند.

نانوحباب‌ها با افزایش راندمان اکسیداسیون، تجزیه مواد آلی (باقی‌مانده خوراک، فضولات ماهی و ذرات معلق) را تسریع می‌کنند و شاخص‌های BOD، کدورت و آمونیاک را کاهش می‌دهند. این بهبود کیفیت آب، شرایط نامناسب برای رشد باکتری‌ها و قارچ‌های بیماری‌زا را ایجاد کرده و در نتیجه، نیاز به درمان دارویی بیماری‌های قارچی، انگلی و باکتریایی را کاهش می‌دهند. همچنین، کاهش تجمع مواد زائد در کف مخازن، ضایعات زیستی را کم کرده و احتمال شیوع بیماری‌های محیطی را کاهش می‌دهند.

در سیستم‌های مدار بسته (RAS) و نیمه‌بسته، استفاده از نانوحباب باعث می‌شود نیاز به تعویض مکرر آب کمتر شود، زیرا کیفیت آب برای مدت طولانی‌تری حفظ می‌گردد. این موضوع، نه تنها مصرف آب را کاهش می‌دهد، بلکه نیاز به استفاده از مواد شیمیایی ضد عفونی‌کننده (مانند کلر، پرمنگنات، فرمالین و غیره) را نیز پایین می‌آورد. در نتیجه، کل مصرف دارو و مواد شیمیایی در مزرعه کاهش می‌یابد و هم‌زمان، اثرات منفی زیست‌محیطی ناشی از پساب‌های آلوده نیز کمتر می‌شود.

در پرورش قزل آلا و سایر ماهیان سردآبی، بیماری‌های باکتریایی (مانند یرسینیوز، فلکسی باکتریوز) و قارچی (مانند ساپروولگنیا) از مشکلات شایع هستند که معمولاً با آنتی‌بیوتیک‌ها و ضدقارچ‌ها درمان می‌شوند. گزارش‌های میدانی نشان می‌دهند که استفاده از نانوحباب در مزارع قزل آلا، با کاهش استرس، بهبود کیفیت آب و کاهش بار میکروبی، شیوع این بیماری‌ها را محدود کرده و نیاز به مصرف آنتی‌بیوتیک‌ها را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، کاهش تلفات و بهبود سلامت عمومی ماهی، منجر به کاهش نیاز به مداخلات دارویی پیشگیرانه و درمانی می‌شود.

در پرورش ماهیان گرم‌آبی مانند کپور و تیلapia، بیماری‌های باکتریایی (مانند آئروموناس و ویبریو)، انگلی و قارچی نیز چالش‌های مهمی هستند. مطالعات و گزارش‌های عملی نشان می‌دهند که نانوحباب‌ها با تولید گونه‌های فعال اکسیژن و بهبود کیفیت آب، محیط را برای رشد این عوامل بیماری‌زا نامناسب می‌کنند و در نتیجه، نیاز به مصرف آنتی‌بیوتیک‌ها و ضد انگل‌ها (مانند پرمنگنات پتاسیم و فرمالین) را کاهش می‌دهند. همچنین، کاهش استرس و بهبود رشد ماهی، مقاومت آن‌ها را در برابر بیماری‌ها افزایش داده و دفعات و شدت شیوع بیماری را کاهش می‌دهد.

مصرف گسترده و مداوم آنتی‌بیوتیک‌ها در آبرزی پروری، می‌تواند منجر به توسعه مقاومت آنتی‌بیوتیکی در باکتری‌های بیماری‌زا شود که هم برای سلامت آبزیان و هم برای سلامت انسان خطرناک است. کاهش مصرف آنتی‌بیوتیک‌ها با استفاده از نانوحباب، خطر توسعه مقاومت آنتی‌بیوتیکی را کاهش داده و به حفظ کارایی داروها در آینده کمک می‌کند.

داروهای مصرف‌شده در آبرزی پروری، از طریق پساب‌ها به محیط زیست وارد شده و می‌توانند اکوسیستم‌های آبی را آلوده کنند. کاهش مصرف دارو با استفاده از نانوحباب، آلودگی ناشی از پساب‌های آلوده را کاهش داده و به حفظ اکوسیستم‌های طبیعی کمک می‌کند. همچنین، کاهش تولید ضایعات زیستی و بهبود کیفیت آب، اثرات منفی زیست‌محیطی فعالیت‌های آبرزی پروری را به حداقل می‌رساند.

فصل پنجم: مروری بر توصیه‌های کاربردی

حوزه کاربرد	نانوحباب مناسب	تأثیر
افزایش برداشت ماهی	هوا یا اکسیژن	افزایش وزن تا ۱۲۷ درصد
افزایش برداشت میگو	اکسیژن	افزایش برداشت تا ۲۱۴ کیلوگرم، افزایش ۱۷ درصد نرخ بقا
تصفیه فاضلاب (آنتی‌بیوتیک‌ها)	ازن	حذف ۲۰ درصد بیشتر از هوا
تصفیه فاضلاب (حذف آمونیاک)	اکسیژن	حذف ۷۰ تا ۸۳ درصد در ۴۵ دقیقه
کنترل باکتری‌ها	ازن	حذف ۹۹,۹۹ درصد در ۱ دقیقه
کنترل ویروس‌ها	هیدروژن	کاهش ۵۰ درصد مرگ‌ومیر
بهبود سیستم ایمنی	ازن	افزایش بیان ژن‌های ایمنی، نرخ بقا ۶۰ تا ۷۰ درصد

فصل ششم: تامین اکسیژن مورد نیاز در پرورش ماهیان سردآبی

پرورش قزل‌آلای رنگین کمان از مهم‌ترین شاخه‌های آبرزی پروری سردآبی است و موفقیت آن وابستگی بسیار زیادی به کیفیت آب، به‌ویژه اکسیژن محلول، دارد. در این گونه، اکسیژن نه فقط یک عامل تنفسی، بلکه تعیین‌کننده رشد، اشتها، ضریب تبدیل غذایی، بقا، تحمل استرس و حتی ظرفیت نگهداری مزرعه است. در عمل، دو رویکرد اصلی برای تأمین اکسیژن وجود دارد: هوادهی و اکسیژن‌رسانی. هوادهی معمولاً به وارد کردن هوا به آب یا مخلوط کردن آب و هوا برای رسیدن به تعادل اکسیژن گفته می‌شود، در حالی که اکسیژن‌رسانی به تزریق اکسیژن خالص به آب اطلاق می‌شود. اگرچه این دو روش گاهی در گفتار روزمره به جای هم به کار می‌روند، اما از نظر فنی، راندمان، هزینه و اثر بر تولید، تفاوت‌های مهمی دارند.

در این بخش از کتاب آموزشی، سه مفهوم کلیدی در تأمین اکسیژن مورد نیاز برای پرورش ماهی را تشریح خواهیم نمود: نیازهای فیزیولوژیکی ماهی، سیستم‌های تأمین اکسیژن مایع (مخازن کرایوژنیک) و سیستم‌های تولید اکسیژن در محل (PSA) این اطلاعات به آبرزی پروران در انتخاب روش مناسب برای مجموعه پرورشی کمک خواهد کرد.

۶.۱. نیاز اکسیژنی قزل‌آلا

اکسیژن محلول در آب (Dissolved Oxygen - DO) برای بقا، رشد و سلامت ماهی قزل‌آلا حیاتی است. قزل‌آلا به عنوان یک ماهی سردابی، به سطوح نسبتاً بالایی از اکسیژن محلول نیاز دارد. این نیاز به عوامل مختلفی بستگی دارد:

- دمای آب: رابطه‌ای معکوس با اکسیژن دارد. هرچه دمای آب گرم‌تر باشد، ظرفیت انحلال اکسیژن در آب کمتر شده و نیاز تنفسی ماهی افزایش می‌یابد. این موضوع در ماه‌های گرم سال یا در سیستم‌های با دمای کنترل‌نشده بسیار حیاتی است.
- اندازه و تراکم ماهی: ماهی‌های بزرگ‌تر و متراکم‌تر، اکسیژن بیشتری مصرف می‌کنند. با رشد ماهی‌ها در طول دوره پرورش، باید میزان اکسیژن‌رسانی به سیستم افزایش یابد.
- فعالیت و تغذیه: پس از غذادهی، فعالیت متابولیکی ماهی افزایش یافته و مصرف اکسیژن به طور قابل‌توجهی بالا می‌رود.

سطح اکسیژن ایده آل برای قزل آلا معمولاً بین ۸ تا ۱۲ میلی گرم در لیتر است. افت اکسیژن زیر ۵ میلی گرم در لیتر باعث ایجاد استرس، کاهش اشتها، تضعیف سیستم ایمنی و نهایتاً تلفات می شود. بنابراین، پایش مستمر و تأمین مطمئن اکسیژن، یکی از ارکان اصلی مدیریت موفق یک مزرعه پرورش قزل آلا محسوب می شود.

۶.۲. مقایسه اکسیژن رسانی و هوادهی در پرورش ماهیان سردابی

هوادهی فرآیندی است که طی آن آب و هوا با هم تماس مؤثر پیدا می کنند تا اکسیژن بیشتری وارد آب شود. این کار می تواند با روش های مختلفی مانند هم زدن سطحی، فواره کردن آب، پدل ویل، اسپلش، بلوئر، برج هوادهی و دیفیوزرهای هوا انجام شود. مزیت هوادهی نسبت به اکسیژن خالص، ارزان تر و ساده تر بودن و کمک به خروج CO_2 و برخی گازهای محلول است و محدودیت های آن راندمان انتقال اکسیژن پایین تر، عدم تأمین اکسیژن در تراکم های بالا، اختلاط و تلاطم بیش از حد و مصرف انرژی بسیار بیشتر از کارایی آن می باشد.

در مقابل اکسیژن رسانی یعنی وارد کردن اکسیژن با غلظت بالا یا خالص به آب که معمولاً توسط دستگاه اکسیژن ساز یا مخزن اکسیژن مایع تأمین و با استفاده از مخروط اکسیژن، مخلوط کن های فشاری یا سامانه های نانو حباب به آب وارد می شود. در این روش، به علت اینکه غلظت اکسیژن تزریقی بالاست، می توان اکسیژن محلول یا DO را تا مقادیر فوق اشباع کنترل شده رساند. لذا در پرورش متراکم و سیستم مدار بسته یا RAS، این روش از نظر فنی برتری زیادی دارد، زیرا حجم بیشتری از اکسیژن در زمان کمتر، صرف انرژی کمتر و با کنترل بهتر وارد آب می شود. به همین دلیل، در تراکم بالا، اکسیژن رسانی غالباً به عنوان ابزار اصلی استفاده می شود. مزایای اکسیژن رسانی شامل افزایش مؤثر و سریع اکسیژن محلول یا DO، امکان نگهداری تراکم های بالاتر، کاهش استرس و بهبود رشد، کاهش ضریب تبدیل غذا و کاهش مصرف انرژی نسبت به هوادهی می باشد. بنابراین برای سیستم های مدار بسته و نیمه مدار بسته این روش مناسب تر از هوادهی است. در عین حال هزینه سرمایه گذاری و عملیاتی آن بالاتر از هوادهی ساده است و نیازمند کنترل دقیق تر می باشد.

۶.۳. تأثیر بر کیفیت آب

کیفیت آب در قزل آلا فقط به اکسیژن محدود نیست، اما اکسیژن نقش مرکزی دارد. وقتی DO پایین باشد، متابولیسم ماهی، دفع مواد زائد و کارایی سیستم ایمنی افت می کند و در نتیجه آمونیاک، CO_2 و سایر ترکیبات مضر سریع تر اثر می گذارند. در این شرایط، حتی اگر خوراک دهی و دما مناسب باشد، تولید پایدار نخواهد بود.

کل بار جامدات معلق یا TSS یکی از شاخص های مهم کیفیت آب است، زیرا ذرات معلق می توانند آبشش ها را تحریک کنند، شفافیت را کاهش دهند و به طور غیرمستقیم تبادل گاز را مختل کنند. هوادهی، به ویژه در قالب هم زدن

و تلاطم، باعث خرد شدن فضولات و باقی ماندن آن‌ها در ستون آب و عدم کارایی سیستم فیلتراسیون در حذف مواد معلق می‌شود و بار معلق را در سیستم بالا نگه می‌دارد. اکسیژن‌رسانی مستقیماً، به‌خودی‌خود برای حذف TSS طراحی نشده است، اما در سیستم‌های RAS با کمک فیلتراسیون مکانیکی و بیولوژیک، کیفیت آب را بهتر تثبیت می‌کند. در نتیجه، از نظر کنترل TSS، اکسیژن‌خالص بسیار بهتر است. بقای ماهی در طول دوره پرورش یکی از حساس‌ترین شاخص‌های عملکرد مزرعه است. افت اکسیژن باعث استرس، کاهش ایمنی، افزایش حساسیت به انگل‌ها و بیماری‌ها و در نهایت مرگ و میر می‌شود. از این جهت، اکسیژن‌رسانی و هوادهی هر دو مهم‌اند، اما اکسیژن‌رسانی در شرایط بحرانی مؤثرتر است. هوادهی بیشتر نقش «پایداری پایه» را ایفا می‌کند؛ یعنی کمک می‌کند سیستم از شرایط بحرانی دور بماند. اکسیژن‌رسانی نقش «کنترل دقیق» دارد؛ یعنی در زمان اوج بار زیستی، پس از غذا، گرما، یا قطع برق می‌تواند سقوط DO را جبران کند.

۶.۴. تراکم قابل نگهداری

تراکم قابل نگهداری مستقیم به توان اکسیژن‌رسانی و سیستم تصفیه وابسته است. در استخرهایی که فقط هوادهی دارند، تراکم قابل نگهداری پایین‌تر است، زیرا اکسیژن ورودی محدودتر و نوسانات DO بیشتر است. در مقابل، با اکسیژن‌رسانی مستقیم، می‌توان تراکم بالاتر را با ریسک کمتر نگه داشت. به‌صورت عملی، در قزل‌آلا هرچه به سمت تراکم‌های بالاتر و سیستم‌های RAS برویم، اکسیژن‌رسانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. اگر اکسیژن کافی نباشد، افزایش تراکم به‌جای افزایش تولید، به افت رشد، افزایش تلفات و بالا رفتن هزینه تمام‌شده می‌انجامد.

۶.۵. اقتصاد پرورش: هزینه تولید و بازگشت سرمایه

از نظر اقتصادی، هوادهی معمولاً سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه بهره‌برداری پایین‌تری دارد. برای مزارع کوچک یا متوسط، این مزیت مهم است، زیرا تجهیز به پدل‌ویل، بلوئر یا برج هوادهی مقرون‌به‌صرفه‌تر از سامانه‌های اکسیژن خالص است. اما اگر هزینه خوراک، تلفات و زمان پرورش را هم حساب کنیم، اکسیژن‌رسانی در تراکم‌های بالا می‌تواند سودآوری بیشتری ایجاد کند و در مدت کوتاهی سرمایه‌گذاری انجام شده را بازگرداند. زیرا خوراک معمولاً بزرگ‌ترین جزء هزینه تولید است و اگر اکسیژن‌رسانی باعث بهبود FCR شود، هزینه خوراک به ازای هر کیلو گرم محصول کاهش می‌یابد. این کاهش، در دوره‌های تولید متعدد، هزینه اکسیژن جبران می‌شود. همچنین، وقتی رشد بهتر شود، ماهی زودتر به وزن بازار می‌رسد و کوتاه شدن دوره پرورش یعنی سرمایه زودتر برمی‌گردد، خطر بیماری

و نوسان دما کمتر می شود و ظرفیت تولید سالانه بالا می رود. لذا باید گفت دوره بازگشت سرمایه در هوادهی ساده معمولاً کوتاه تر است، چون خرید و نگهداری آن ارزان تر است. اما در سامانه های متراکم، اکسیژن رسانی ممکن است با وجود CAPEX بالاتر، به دلیل افزایش تولید و کاهش FCR، بازگشت سرمایه بهتری در میان مدت داشته باشد.

۶.۶. نانوحباب به عنوان گزینه پیشرفته

نانوحباب ها در واقع یک سطح پیشرفته تر از انتقال اکسیژن خالص به آب می باشند. همانطور که در مباحث قبلی ذکر گردید، این فناوری با افزایش راندمان انتقال اکسیژن و پایداری حباب ها، می تواند هم کیفیت آب را بهتر کند و هم مصرف انرژی و مواد شیمیایی را کاهش دهد.

فصل هفتم: سیستم های تامین اکسیژن خالص

الف: تامین اکسیژن با مخازن کرایوژنیک (اکسیژن مایع)

یکی از روش های تامین اکسیژن، استفاده از اکسیژن مایع است که در مخازن کرایوژنیک نگهداری می شود.

اصول عملکرد و ویژگی ها

اکسیژن مایع، اکسیژنی است که با سرد کردن تا دمای حدود منهای ۱۸۰ درجه سانتی گراد به حالت مایع درآمده است. این فرآیند باعث کاهش چشمگیر حجم گاز می شود و امکان ذخیره سازی مقادیر بسیار زیاد اکسیژن را در فضایی کوچک فراهم می کند. برای نگهداری این مایع فوق سرد، از مخازن کرایوژنیک با ساختار دو جداره و عایق بندی پیشرفته (معمولاً با خلاء بالا و مواد عایق) استفاده می شود تا از نفوذ گرما و تبخیر سریع محصول جلوگیری شود. این مخازن بدون نیاز به برق کار کرده و فشار کاری پایین و ایمنی دارند. عدم نیاز به نگهداری در فضای مسقف، یکی دیگر از مزایای عملیاتی آن است.



شکل ۷: مخزن کرایوژنیک ذخیره اکسیژن مایع

ب: تولید اکسیژن در محل با سیستم‌های PSA

سیستم‌های جذب با نوسان فشار (Pressure Swing Adsorption - PSA)، روشی مدرن و خودکفا برای تولید اکسیژن در محل مورد نیاز پرورش ماهی هستند.

اصول عملکرد

این سیستم‌ها با استفاده از هوای محیط کار می‌کنند. یک کمپرسور، هوای محیط را فشرده کرده و از میان بستری از غریبال‌های مولکولی (معمولاً زئولیت) عبور می‌دهد. این غریبال‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که مولکول‌های نیتروژن را به خود جذب کنند و اجازه عبور مولکول‌های اکسیژن را بدهند. با چرخش بین دو بستر جاذب که یکی در حال جذب و دیگری در حال بازیابی است، جریانی پیوسته از اکسیژن با خلوص بالا (معمولاً ۹۰ تا ۹۵ درصد) تولید می‌شود.



شکل ۸: ستون‌های جذب اکسیژن سیستم PSA

بزرگ‌ترین مزیت PSA، استقلال کامل از تأمین‌کنندگان خارجی است و با وجود هزینه اولیه دستگاه، هزینه تولید اکسیژن به مراتب کمتر از خرید مداوم اکسیژن مایع یا کپسول است. همچنین، این سیستم‌ها نیازی به ذخیره‌سازی و کار با مایعات فوق‌سرد نداشته و ایمنی بالاتری دارند. چالش اصلی این سیستم‌ها، هزینه اولیه تجهیزات و مصرف برق و همچنین نیاز به نگهداری دوره‌ای برای تعویض فیلترها و سرویس کمپرسور است. همچنین، یک سیستم PSA تنها در صورت وجود برق پایدار قادر به تولید اکسیژن خواهد بود. بر اساس اطلاعات موجود در جدول زیر می‌توان در انتخاب بین اکسیژن مایع و تولید اکسیژن در محل، برای هر مزرعه، تصمیم‌گیری نمود.

جدول ۱۰: مقایسه معایب و مزایای دو روش اصلی تامین اکسیژن خالص

ویژگی	اکسیژن مایع	تولید اکسیژن در محل (اکسیژن ساز PSA)
هزینه	هزینه اولیه خرید مخزن + خرید مداوم اکسیژن مایع، هزینه های حمل و نشت مداوم اکسیژن	هزینه اولیه دستگاه + برق مصرفی
استقلال	وابسته به تأمین کننده و زمان تحویل	استقلال کامل و کنترل بر تولید اکسیژن
خلوص اکسیژن	خلوص بالا حدود ۹۹٪ برای اکسیژن مایع	خلوص قابل تنظیم (معمولاً ۹۰ تا ۹۵٪)
تأثیرات محیطی	حمل و نقل و مصرف انرژی برای تولید	کاهش قابل توجه حمل و نقل و انتشار گازهای گلخانه ای
عملکرد در شرایط سخت	وابسته به دسترسی جاده ای و شرایط آب و هوایی	مناسب برای مناطق دورافتاده و شرایط سخت مانند سرمای شدید
وابستگی به تامین برق	ندارد	کاملاً وابسته
موارد احتیاطی	خطر اشتعال و انفجار در صورت استفاده از روغن و گریس در اتصالات مخزن	خطر از بین رفتن ژئولیت دستگاه در صورت رسیدن رطوبت به مولد

بر اساس بررسی های اقتصادی به عمل آمده توسط نگارنده، در پرورش ماهی قزل آلا در کشور ایران به هیچ وجه استفاده از مخازن کرایوژنیک اکسیژن مایع به جز در مزارعی که به منبع برق دسترسی ندارند، توصیه نمی شود. زیرا باعث افزایش شدید هزینه پرورش و قیمت تمام شده ماهی می گردد.

مهمترین روش های انتقال اکسیژن به آب

صرف تولید اکسیژن کافی نیست؛ نحوه انتقال آن به آب نیز بسیار مهم است. به طوریکه تا حد امکان، اکسیژن خالص هدر نرود. روش های کارآمد عبارتند از مخروط های اکسیژن و سامانه های نانو حباب. که سامانه نانو حباب به دلیل عدم خروج اکسیژن وارد شده به آب و وجود پتانسیل زتا که باعث خاصیت آنتی باکتریال آن می شود، بسیار بهتر از مخروط اکسیژن است و کارایی انتقال اکسیژن را بسیار افزایش می دهد.

توصیه‌های عملی برای پرورش‌دهندگان (به ویژه ماهیان سردابی):

۱. برای افزایش بهره‌وری:

- از نانوحباب اکسیژن در سیستم‌های پرورش متراکم استفاده کنید. نانوحباب اکسیژن باعث افزایش وزن، نرخ رشد و بقا می‌شود.

۲. برای کنترل بیماری‌ها:

- از نانوحباب ازن برای ضدعفونی آب ورودی و مخازن قرنطینه استفاده کنید (زمان تماس آب و ازن ۱۵-۱۰ دقیقه است).
- از نانوحباب اکسیژن به عنوان مکمل فاژدرمانی استفاده کنید.
- از نانوحباب هیدروژن برای کاهش استرس اکسیداتیو و کنترل ویروس‌ها استفاده کنید.

۳. برای تصفیه فاضلاب:

- از نانوحباب ازن برای تخریب آنتی‌بیوتیک‌ها و داروها استفاده کنید.
- از نانوحباب اکسیژن برای کاهش آمونیاک و نیتريت در سیستم‌های RAS استفاده کنید.

۴. نکات ایمنی:

- دوز و زمان تیمار با نانوحباب ازن را دقیقاً کنترل کنید. از تیمار طولانی مدت با ازن (بیش از ۱۵-۱۰ دقیقه) خودداری کنید.

پاسخ به سؤالات متداول

سؤال ۱: آیا نانوحباب اکسیژن می تواند جایگزین دستگاه های هوادهی معمولی شود؟ بله، نانوحباب اکسیژن به دلیل ماندگاری طولانی و انتقال بالای اکسیژن، جایگزین بسیار مناسبی برای دیفیوزرها و پدل ویل ها می باشد، اما نیاز به سرمایه گذاری اولیه دارد.

سؤال ۲: آیا نانوحباب ازن برای ماهی و میگو سمی است؟ در غلظت های کم و زمان های کوتاه، ایمن است. اما غلظت های بالا یا زمان های طولانی می تواند باعث آسیب آبشش و مرگ شود. بنابراین زمانی که از غلظت بالا برای ازن بین بردن عوامل بیماریزا از نانوحباب ازن استفاده می کنیم نباید در استخراج ازن زنی ماهی حضور داشته باشد.

سؤال ۳: هزینه استفاده از نانوحباب در آبرزی پروری چقدر است؟ بر اساس مطالعات، دوره بازگشت سرمایه حدود یک تا دو دوره پرورش است و پس از آن، سودآوری قابل توجهی دارد.

سؤال ۴: آیا نانوحباب در آب شور نیز مؤثر است؟ بله، مطالعات متعدد در آب شور (مانند پرورش میگو) نشان داده است که نانوحباب ها در آب شور نیز مؤثر هستند، اگرچه پایداری آنها ممکن است در آب شور کمتر باشد.

- Dien, L. T., Linh, N. V., Mai, T. T., Senapin, S., St-Hilaire, S., Rodkhum, C., & Dong, H. T. (2022). Impacts of oxygen and ozone nanobubbles on bacteriophage in aquaculture system. *Aquaculture*, *551*, 737894. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.737894>
- Ebina, K., Shi, K., Hirao, M., Hashimoto, J., Kawato, Y., Kaneshiro, S., Morimoto, T., Koizumi, K., & Yoshikawa, H. (2013). Oxygen and air nanobubble water solution promote the growth of plants, fishes, and mice. *PLoS ONE*, *8*(6), e65339. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065339>
- Farid, M. U., Choi, P. J., Kharraz, J. A., Lao, J.-Y., St-Hilaire, S., Ruan, Y., Lam, P. K. S., & An, A. K. (2022). Hybrid nanobubble-forward osmosis system for aquaculture wastewater treatment and reuse. *Chemical Engineering Journal*, *435*, 135164. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135164>
- Juhnkeaw, C., Khongcharoen, N., Rungrueng, N., Sangpo, P., Panphut, W., Thapinta, A., Senapin, S., St-Hilaire, S., & Dong, H. T. (2021). Ozone nanobubble treatment in freshwater effectively reduced pathogenic fish bacteria and is safe for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, *534*, 736286. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736286>
- Ng, P. H., Huang, Q., Huang, L., Cheng, T. H., Man, K. Y., Cheng, K. P., Rita, P. M. A., Zhang, J., & St-Hilaire, S. (2023). Assessment of ozone nanobubble technology to reduce freshwater algae. *Aquaculture Research*, *2023*, Article ID 9539102. <https://doi.org/10.1155/2023/9539102>
- Yapararne, S., Morón-López, J., Bouchard, D., Garcia-Segura, S., & Apul, O. G. (2024). Nanobubble applications in aquaculture industry for improving harvest yield, wastewater treatment, and disease control. *Science of the Total Environment*, *912*, 170379. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170379>



Nano Bubbles in Aquaculture: Enhancing Production, Recirculating Water Treatment and Disease Control

این کتابچه با هدف معرفی فناوری نانوجباب و کاربردهای آن در آبی پروری تدوین شده است. نانوجباب ها با افزایش اکسیژن، محلول، بهبود کیفیت آب در گردش کاهش عوامل استرس زا و کاهش هزینه های تولید ایفا می کنند.

در این، راهنما، مبانی، علمی، روش های تولید نانوجباب، کاربرد آن در استخرها و سیستم های مدار بسته، بهینه سازی عملکرد نمونه های عملی، نتایج پژوهش ها و تجربیات ارائه شده است تا به عنوان مرجعی کاربردی برای بهره برداران، کارشناسان و دانشجویان مورد استفاده قرار گیرد.

آدرس: اراک، کیلومتر ۵ جاده خمین،
بارک علم و فناوری استان مرکزی،
مجتمع شماره ۱، شرکت نانو صنعت آرمان.

پست الکترونیک:
nanobubble.arman@gmail.com

آدرس سایت: اینترنتی:
www.nanoarman.com

تلفن:
۰۸۶۹۹۸۸۲۴۵۶
۰۹۹۰۱۸۰۳۴۲۱

کانال ایتا:
@nanohobabarman



ISBN:978-964-04-6419-9



9 789640 464199