Journal of Aquaculture Sciences 12(22): 49-79 (2024)
Print ISSN: 2322-5351
www.aquaculturesciences.ir

نشریه علوم آبزی‌پروری
دوره ۱۲، شماره ۲۲: ۴۹-۷۹ (۱۴۰۳)

نانوفناوری؛ رویکردی نوین و کاربردی در آبزی‌پروری و فرآوری محصولات شیلاتی

علیرضا ربیع‌پور*، هانیه رستم‌زاد

گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، گیلان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۴ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۹**

چکیده

با توجه به شناخت روزافزون نقش حیاتی آبزیان در تولید محصولات با ارزش‌افزوده بالا و ارتقای سلامت انسان، صنایع شیلاتی و آبزی‌پروری جایگاه قابل توجهی را در جهان به‌دست آورده‌اند. با وجود این، این صنایع با چالش‌های متعددی مانند آلودگی آب، شیوع بیماری، رشد کند آبزیان، استحکام و کیفیت پایین خوراک و بسیاری مسائل دیگر مواجه هستند. از طرف دیگر، محصولات شیلاتی به‌سبب وجود ترکیباتی مانند اسیدهای چرب چند غیراشباع و پروتئین‌ها، فسادپذیری بالایی دارند؛ بنابراین دستیابی به روش‌های نوین نگهداری برای آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. بر این اساس، نانوفناوری می‌تواند به‌عنوان یک تکنولوژی پیشرو با قابلیت‌های چندوجهی جهت رسیدگی به این چالش‌ها مفید باشد. هدف از این تحقیق، بررسی کاربردهای اساسی نانوفناوری به‌عنوان ابزاری نوآورانه در بخش‌های مختلف آبزی‌پروری و فرآوری محصولات شیلاتی است. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که نانوفناوری می‌تواند در تشخیص و مدیریت بیماری‌های آبزیان، داورسانی کارآمد و تولید واکسن، افزایش رشد ماهی، افزایش برداشت و بازده‌ی صید، مهندسی آبزی‌پروری، کنترل رسوبات زیستی و مدیریت استخرها، تصفیه آب و مدیریت محیط‌های آبی مورد استفاده قرار گیرد. در حوزه فرآوری محصولات شیلاتی، نانوساختارهایی مانند نانولوله‌ها، نانوکامپوزیت‌ها، نانوامولسیون‌ها و نانولیپوزوم‌ها کاربردهای متنوعی را در ان‌کپسوله‌سازی و رهایش کنترل‌شده در محصولات غذایی، بهبود فراهمی زیستی و پایداری، حفظ ارزش غذایی و افزایش زمان ماندگاری محصولات شیلاتی ارائه می‌دهند. همچنین، نانوحسگرهای زیستی، نانوبرچسب‌گذاری و نانوکدگذاری، نقش‌های تعیین‌کننده‌ای در تضمین تازگی و کیفیت محصولات شیلاتی دارند. آن‌ها تشخیص مواد تقلبی، مواد سمی و حساسیت‌زا، شناسایی و ردیابی محصول، تجزیه و تحلیل خطر را تسهیل کرده، و مدیریت زنجیره تأمین را افزایش می‌دهند. با این حال، شایان ذکر است که استفاده غیراصولی و بیش از حد از نانومواد، همراه با رهاسازی کنترل نشده آن‌ها در محیط، می‌تواند خطراتی را برای سلامتی آبزیان و انسان‌ها ایجاد کند. از این‌رو، رویکرد دقیق‌تر و اصولی‌تر به مدیریت نانومواد در این زمینه ضروری است.

کلید واژگان: آبزی‌پروری، نانوفناوری، فرآوری محصولات شیلاتی، نانوذرات، توسعه پایدار

*نویسنده مسئول rabiepooralireza@gmail.com

مقدمه

در سال‌های اخیر، مصرف‌کنندگان آن دسته از مواد غذایی را ترجیح می‌دهند که توانایی بهبود سلامت و کاهش یا تأخیر خطر ابتلا به بیماری‌ها را داشته باشند. از طرف دیگر، با پیشرفت علم و گسترش بسیاری از بیماری‌های مرتبط با رادیکال‌های آزاد و استرس اکسیداتیو، اهمیت ترکیبات فعال زیستی و استفاده از آن‌ها در صنایع غذایی–دارویی کاملاً شناخته شده است (ربیع‌پور و زکی‌پور رحیم‌آبادی، ۱۴۰۲). محیط دریایی منبع بسیار متنوعی از موجودات زنده با ترکیبات زیست‌فعال است. به‌طوری که این مواد زیست‌فعال خواص و کاربردهای منحصر به‌فردی در زمینه‌های مختلف دارند و آبزیان دریایی به‌دلیل ارزش غذایی بالا جایگاه مناسبی در سبد غذایی خانواده‌ها پیدا کرده‌اند (Rabiepour *et al*., 2023). بنابراین به‌دلیل افزایش نیاز به غذاهای دریایی و آبزیان از جمله ماهی در سطح جهان، شیلات و آبزی‌پروری یکی از بزرگ‌ترین بخش‌های تولید و فرآوری مواد غذایی هم از نظر تأثیر اقتصادی و هم از نظر امنیت غذایی در نظر گرفته می‌شوند. به‌طوری‌که توسعه مداوم این صنعت به‌عنوان یک استراتژی مهم برای تضمین ایمنی و امنیت غذایی جهانی است (Souza *et al*., 2017; Fajardo *et al*., 2022). بنابراین، آبزی‌پروری می‌تواند یکی از بزرگ‌ترین صنایع کمک‌کننده به اهداف توسعه پایدار در سال ۲۰۳۰ باشد (FAO, 2018). با این حال، آلودگی‌های محیطی، شیوع بیماری‌ها و بسیاری موارد دیگر از جمله چالش‌های اساسی برای این بخش در نظر گرفته می‌شوند که بر روی آبزی‌پروری برای دستیابی به امنیت غذایی جهانی تأثیر منفی می‌گذارند (Shah and Mraz, 2020; Nasr-Eldahan *et al*., 2021). از طرف دیگر، محصولات شیلاتی حاوی طیف وسیعی از ترکیبات زیست‌فعال و منابع ارزشمندی از ریزمغذی‌ها، پروتئین، اسیدهای آمینه ضروری، لیپیدها و دیگر ترکیبات هستند؛ که به‌دلیل اسیدهای چرب غیراشباع، محتوای بالای آب، آنزیم‌های اتولیتیک، pH نزدیک به خنثی و محتوای کم‌تر بافت همبند می‌توانند به سرعت فاسد شوند و طعم و بوی نامطبوعی ایجاد کنند (Shankar *et al*., 2019; Rabiepour and Hodhodi, 2023). از این‌رو، حفظ ارزش غذایی، کیفیت و تازگی مواد غذایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و روش‌های مرسوم و معمول نگهداری از جمله انجماد، تیمارهای شیمیایی، بسته‌بندی و غیره قادر به مهار فساد آنزیمی و میکروبیولوژیکی و یا بالقوه سمی نیستند. بنابراین، تقاضای مصرف‌کنندگان برای محصولات شیلاتی با ماندگاری طولانی و کیفیت بالا، صنایع غذایی را ترغیب کرده است تا روش‌های نگهداری بسیار مؤثر را برای افزایش زمان ماندگاری محصولات شیلاتی دنبال کنند (Rostamzad, 2020; Qiu *et al*., 2022). در این میان، نانوفناوری به‌عنوان یک روش جدید ظاهر شده است که می‌تواند راه‌حل‌های مقرون به صرفه، کارآمد و زیست‌محیطی مناسبی را برای حل چالش‌های جهانی بشر ارائه دهد (Tokas *et al*., 2024). نانوفناوری، به‌عنوان مهندسی ایجاد مواد، عملکردها، ابزار و ادوات در مقیاس نانومتری تعریف می‌شود. علم نانو به‌طور فزاینده‌ای در حال توسعه و تبدیل شدن به بخشی از زمینه‌های مختلف مانند الکترونیک، مواد و زیست‌شناسی و غیره است (Jafar and Sutrisno, 2024). علاوه براین، فناوری نانو و سیستم‌های مبتنی بر آن در علوم مختلف از جمله آبزی‌پروری و عمل‌آوری محصولات شیلاتی هم گسترش یافته است. نانوفناوری در دنیای حاضر به‌طور انفجاری در سرتاسر جهان رشد کرده و به ابزاری فراگیر برای حل مشکلات مختلف آبزی‌پروری از جمله تغذیه آبزیان، مدیریت کیفیت آب، درمان بیماری‌های آبزیان، افزایش رشد آبزیان از جمله ماهیان عمل کرده و هم‌چنین به‌عنوان یک عامل کلیدی، کاربردهای امیدوارکننده‌ای در تمامی بخش‌های زنجیره تأمین مواد غذایی از جمله فرآوری و نگهداری محصولات شیلاتی، ارزیابی کیفیت، بسته‌بندی، ذخیره‌سازی و برقراری تضمین کیفی این محصولات به دست آورده است (Khan *et al*., 2020; Fajardo *et al*., 2022; Alak *et al*., 2023). در این تحقیق به‌طور خلاصه به کاربردهای مهم نانوفناوری به‌عنوان یک فناوری نوین در بخش‌های مختلف آبزی‌پروری و فرآوری محصولات شیلاتی و هم‌چنین اثرات مضر نانوفناوری پرداخته شده است.

نانوفناوری

نانوفناوری و سیستم‌های مبتنی بر آن؛ حوزه‌های نوآورانه‌ای از علم هستند که شامل طراحی، شناسایی، ساخت و کاربرد مواد، دستگاه‌ها و سیستم‌ها در سطح نانومتری (۱ تا ۱۰۰ نانومتر) می‌شوند (Kaul *et al*., 2018). فناوری نانو، علمی

است که در تولید و استفاده از ذرات نانومتری (معروف به نانوذرات) کاربرد دارد. هم‌چنین، علمی بسیار امیدوارکننده و به سرعت در حال پیشرفت است که در زمینه‌های مختلفی از جمله زیست‌فناوری، شیمی، مهندسی و فیزیک کاربرد دارد. نانومواد در ابعاد ساختاری مختلفی مانند خوشه‌ها، کریستال‌ها و مولکول‌ها وجود دارند (Chandra, 2016). امروزه این فناوری به آزمایشگاه‌های تحقیقاتی یا واحدهای تولیدی نانوپزشکی در مقیاس کوچک محدود نمی‌شود، بلکه سهم عمده‌ای را در صنایع مختلف به‌خود اختصاص داده است. شرکت‌ها در سراسر جهان اکنون در تلاش هستند تا با بهره‌گیری از فناوری نانو، نوآوری‌های خود را از نظر ساختار، کار و طراحی چشم‌انداز و بهره‌وری کارآمدتر کنند. از واحدهای تولید و فرآوری در مقیاس کوچک مانند واحدهای کشاورزی، غذا و دارو گرفته تا واحدهای تولیدی در مقیاس بزرگ‌تر مانند واحدهای فعال در صنایع خودروسازی، مهندسی عمران، مدیریت محیط‌زیست و غیره که برنامه‌های استفاده حداکثری از نانوفناوری را در دستور کار خود قرار داده‌اند (Malik *et al*., 2023). به‌عنوان مثال، نانوفناوری در زمینه‌های مختلف علوم غذایی و میکروبیولوژی مواد غذایی، از جمله فرآوری مواد غذایی، بسته‌بندی مواد غذایی، توسعه‌ی عملکردی مواد غذایی، ایمنی مواد غذایی، شناسایی عوامل بیماری‌زای مواد غذایی و افزایش ماندگاری محصولات غذایی کاربردهای بالقوه‌ای دارد (Kamali Sabeti *et al*., 2023).

کاربردهای نانوفناوری در آبزی‌پروری

آبزی‌پروری؛ پروتئین‌های قابل هضم، چربی‌های سالم و ریزمغذی‌های ضروری مختلف را برای میلیاردها نفر در سراسر جهان فراهم می‌کند؛ اما این صنعت با موانع و چالش‌هایی روبه‌رو است. بنابراین نیاز به وجود فناوری‌های جدیدی است که بتواند در شناسایی این موانع اصلی مداخله کند و شیوه‌های اصولی مدیریت آبزی‌پروری را ارائه دهد (Baskaran, 2023). فناوری نانو، ارائه‌دهنده خواص فیزیکوشیمیایی منحصر به‌فرد و کاربردهای متنوعی است که مزایای قابل توجهی را برای پرورش آبزیان از جمله ماهی فراهم می‌کند و در نتیجه می‌تواند چالش‌های حیاتی در آبزی‌پروری را برطرف کند (Ahmed *et al*., 2024). به طوری‌که امروزه انواع مختلفی از سیستم‌های مبتنی بر فناوری نانو برای افزایش تولید، کارایی و پایداری صنعت آبزی‌پروری به کار گرفته شده‌اند (Fajardo *et al*., 2022). در ادامه به موارد مهم کاربرد نانوفناوری در آبزی‌پروری پرداخته می‌شود.

۱-تشخیص و کنترل بیماری‌های آبزیان- تحویل مؤثر دارو (دارورسانی کارآمد)

با توسعه‌ی صنعت آبزی‌پروری انتظار می‌رود که ماهیان با انواع بیماری‌های عفونی و غیرعفونی مواجه شوند که از تهدیدات اصلی در سیستم آبزی‌پروری به‌شمار می‌رود. بیماری‌ها می‌توانند عملکرد تولیدمثلی را کاهش داده و تأثیر منفی بر بازده تبدیل خوراک داشته باشند که منجر به کاهش رشد و عملکرد کلی ماهیان پرورش‌یافته می‌شود (Tavares-Dias *et al*., 2017). پاتوژن های باکتریایی که باعث بیماری در ماهیان می‌شوند، دامنه‌ی میزبان وسیعی دارند و ممکن است باعث مرگ و میر بالا یا عفونت‌های مزمن مداوم شوند. علاوه بر هزینه‌های درمانی، درمان‌های پاتوژن‌ها با استفاده از آنتی‌بیوتیک‌ها به‌دلیل افزایش نگرانی‌ها برای ایجاد مقاومت و انتشار محیطی باکتری‌های حاوی ژن‌های مقاومت محدود می‌شوند. بنابراین باید از عوامل ضدباکتری جدید مانند نانومواد در تشخیص، پیشگیری و درمان بیماری‌ها استفاده کرد. پژوهشی توسط Gholipourkanani و همکاران (۲۰۱۹)، به‌منظور بررسی فعالیت ضدباکتریایی روغن‌های ضروری گیاهان *Origanum vulgare*، *Eucalyptus globulus*، *Melaleuca alternifolia* و *Lavendula angustifolia* نانو ان‌کپسوله شده بر علیه سه پاتوژن باکتریایی ماهی انجام گرفت. تمام تیمارها فعالیت ضدباکتریایی نشان دادند و تقریباً در همه موارد، فعالیت نانوامولسیون‌ها نسبت به همتایان روغن‌های ضروری خود برتر بود. نانوامولسیون *Origanum vulgare* (پونه کوهی) مؤثرترین فعالیت ضدباکتریایی را داشت و به‌طور قابل توجهی بهتر از تتراسایکلین است.

کاربرد فناوری نانو در زمینه ابزارهای تشخیصی مانند نانوحسگرها در حال گسترش است. به‌عنوان مثال، نانوذرات طلا در پروتکل تشخیص ایمنی مبتنی بر آنتی‌بادی استفاده می‌شوند (Thiruppathiraja *et al*., 2011). هم‌چنین، نانوحسگرهای ردیابی، با مکان‌یاب‌هایی که داده‌های مربوط

به مکان‌یابی جغرافیایی و وضعیت سلامت ماهی را ارسال می‌کنند، گزارش شده‌اند که امکان کنترل ماهیان یا توسعه سیستم‌های قفس هوشمند جهت پرورش ماهیان را فراهم می‌کنند (Sekhon, 2014). نانوفناوری علاوه بر تشخیص بیماری‌ها به‌عنوان نانودارو نیز کاربرد وسیعی دارد که صنعتی در حال توسعه است و در حفظ سلامت ماهیان مؤثر است. در این راستا، از خواص ذاتی اشکال مختلف نانوذرات برای بهبود سلامت ماهی استفاده می‌شود. در حال حاضر از نقره، اکسید روی، دی‌اکسید تیتانیوم، اکسید مس و نانوذرات گرافن برای کاهش بار بیماری‌زایی در سیستم آبزی‌پروری استفاده می‌شود (Siddiqi *et al*., 2018). به‌عنوان مثال، تجمع نانواکسید تیتانیوم در مخزن مزارع پرورش ماهی برای پیشگیری از بیماری‌های ناشی از باکتری پیشنهاد می‌شود (Cheng *et al*., 2008). علاوه بر این، یکی دیگر از کاربردهای نانواکسید تیتانیوم، دستیابی به اثر استریلیزاسیون مطلوب بر روی میکروب‌های بیماری‌زا مانند *Escherichia coli*، *Aeromonas hydrophilia* و *Vibrio anguillarumat* با یک غلظت و زمان واکنش مشخص است که بدون آن استریلیزاسیون نمی‌تواند موفقیت‌آمیز باشد (Huang *et al*., 2015). علاوه براین، نانوذرات طلا (AuNPs) یکی از مناسب‌ترین نانوذرات برای تشخیص بیماری‌های مختلف در ماهی و میگو هستند (Saleh *et al*., 2015). برای این نوع کاربردها، نانوحامل‌های مختلفی مانند کیتوزان، لیپوزوم‌ها، نانوذرات پلیمری پلی‌لاکتیک-کو-گلیکولیک اسید ((Poly Lactic-Co-Glycolic Acid) (PLGA)) به‌طور گسترده در دارورسانی برای ماهیان استفاده می‌شوند (Sarkar *et al*., 2022). علاوه بر این، Korni و Khalil (۲۰۱۷)، گزارش کردند که نانوذرات زنجبیل، قادر به جلوگیری از عفونت سپتی‌سمی آئروموناس (Aeromonas septicaemia) متحرک در بچه ماهیان کپور آسیایی هستند. یک مطالعه به‌منظور پیشگیری و درمان ماهیان طلایی (*Carassius auratus*) در برابر بیماری‌های لکه قرمز و لکه سفید با استفاده از نانوذرات نقره انجام شد. ماهیان در مدت ۳ روز درمان فوری از عفونت را نشان دادند و یک نوبت مصرف ممکن است با استفاده از روش ساده‌ی حمام کردن، در غلظت‌های بسیار کم (۱۰ نانوگرم بر گرم وزن بدن) محافظت طولانی‌مدت را ایجاد کند (Daniel *et al*., 2016). نتایج پژوهش Mansouri-Tehrani و همکاران (۲۰۲۱)، نشان داد که نانوذرات سلنیوم پوشش داده شده با جلبک می‌تواند به‌عنوان یک عامل ضدباکتری جدید و جایگزینی بالقوه برای آنتی‌بیوتیک‌ها در کنترل عفونت ویبریو هاروی (*Vibrio harveyi*) در پرورش *Penaeus vannamei* در نظر گرفته شوند.

از طرف دیگر، واکسن‌ها که به‌عنوان یکی از ابزارهای مهم برای پیشگیری از بروز بیماری‌ها در آبزی‌پروری مورد استفاده قرار می‌گیرند، دارای محدودیت‌هایی هستند؛ به این صورت که اغلب واکسن‌های مورد استفاده به‌صورت مایع در دمای پایین نگهداری می‌شوند و به‌دلیل ماندگاری کوتاه معمولاً به‌صورت داخل وریدی تزریق می‌شوند. نانوواکسن به‌دلیل کاهش این محدودیت‌ها، یک روش واکسیناسیون موثر در آبزی‌پروری است. به‌عنوان مثال، در تحقیقی، مشخص شد که تحویل خوراکی واکسن DNA (Oral delivery of DNA vaccine) با استفاده از نانوذرات کیتوزان در ماهی باس آسیایی (*Lates clacrifer*) باعث محافظت آن در برابر باکتری *Listonella anguillarum* می‌شود (Rajesh Kumar *et al*., 2008). هم‌چنین عصاره‌های گیاهی نیز به شکل نانو به‌عنوان دارو در درمان بیماری‌های ماهیان استفاده می‌شوند و نسبت به نانوذرات سنتز شده شیمیایی سازگاری بیش‌تری با محیط‌زیست دارند. مطالعاتی در این زمینه در مورد استفاده از نانوذرات مبتنی بر عصاره گیاهی در آبزی‌پروری انجام شده است (Awad *et al*., 2020; Baldissera *et al*., 2020; Nirmalkar *et al*., 2022). نتایج بررسی Sukkarun و همکاران (۲۰۲۴)، نشان داد که نانوواکسن مبتنی بر پلیمر کیتوزان یک سیستم تحویل موثر برای واکسیناسیون غوطه‌وری ماهی تیلاپیا (*Oreochromis* sp.) در برابر *Aeromonas veronii* است. بنابراین استفاده از نانو ذرات به‌عنوان سیستم‌های تحویل دارو (دارورسانی) با ویژگی‌های جدیدی مانند رهایش پایدار، تنظیم و کنترل اندازه، شکل، پراکندگی و بار سطحی مواد هدف، مکان خاص، فرآیندهای تحویل چند مسیری و قابلیت تخریب تنظیم‌شده نانوحامل در حال گسترش است (Husen, 2017; Adeyemi *et al*., 2019). به‌عنوان مثال نانولوله‌های کربنی ((Carbon nanotubes) (CNTs)) ابزار جایگزین و کارآمد جدیدی برای انتقال و جابجایی مولکول‌های درمانی هستند. تحویل دارو بر پایه نانولوله کربنی برای اثربخشی بالاتر با عوارض جانبی کم‌تر در

دستیابی به اثربخشی بالاتر داروها امیدوارکننده است. نانولوله‌های کربنی به‌عنوان یک ابزار جدید بالقوه به‌عنوان حامل واکسن برای محافظت از ماهیان پرورشی در برابر پاتوژن‌های بیماری‌زا و بیماری‌های مختلف باکتریایی و ویروسی در ماهیان عمل می‌کنند (Giri and Park, 2022).

۲- نانوذرات جهت کمک به بهبود رشد ماهی

به‌طور سنتی، تغذیه ماهی متکی بر تأمین غذای ماهیان به شکل گلوله‌های غذایی بوده است. این گلوله‌ها عمدتاً براساس نیازهای تغذیه‌ای روزانه ماهی تهیه می‌شوند. یکی از رویکردهای فعلی نانوفناوری این است که نانوذرات با افزایش نسبت و مقدار مواد مغذی مورد نیاز ماهیانی که از بافت روده عبور می‌کنند و به ماهی می‌رسند، به‌جای عبور مستقیم از سیستم گوارشی ماهی که بدون جذب و استفاده است، خوراک آبی و غذای ماهی را غنی و تقویت می‌کنند (Handy, 2012). مواد معدنی غذایی با اندازه‌ی نانو ممکن است راحت‌تر از همتای بزرگ‌تر خود به سلول‌ها نفوذ کنند که جذب آن‌ها در ماهی را تسریع می‌کند. علاوه بر این، اگر بتوان از این فناوری به درستی استفاده کرد، ممکن است اثرات زیست‌محیطی فرآیند تغذیه ماهی را کاهش دهد. برای مثال، افزودن نانولوله‌های کربنی تک‌جداره ((SWCNTs) (Single-walled carbon nanotubes)) به غذای ماهی قزل‌آلا می‌تواند منجر به سفتی و سختی پلت در جیره غذایی ماهی شود که به راحتی در آب تکه تکه نمی‌شود. Alishahi و همکاران (۲۰۱۱)، گزارش کردند که نانوذرات نقره در گلوله‌های غذای ماهی حاوی ویتامین، باعث جذب بهتر مواد مغذی در ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان در مقایسه با قرص های معمولی غذای ماهی می‌شود. به‌علاوه، نانو ذرات سلنیوم و آهن هم در خوراک ماهی جهت بهبود رشد ماهی استفاده شده‌اند. محققان دریافتند که ماهی کپور جوان و ماهیان خاویاری تغذیه شده با نانوذرات آهن به‌ترتیب ۳۰ درصد و ۲۴ درصد نرخ رشد سریع‌تری را از خود نشان دادند (Rather *et al*., 2011). علاوه براین، در تحقیقی دیگر، اثر نانوذرات اکسید آهن چای سبز (*Camellia sinensis*) بر اثربخشی رشد، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و پاسخ ایمنی بچه‌های ماهیان گورامی آبی (*Trichogaster trichopterus*) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در ماهیان تغذیه شده با رژیم غذایی حاوی نانوذرات با غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، عملکرد رشد، ترکیبات بیوشیمیایی، پارامترهای خونی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی در *T. trichopterus* بهبود بخشیده شد. بنابراین می‌توان از این نانوذره به‌عنوان یک مکمل غذایی حیاتی در پرورش ماهیان زینتی استفاده کرد (Paulpandian *et al*., 2023). جدول ۱ فواید برخی از نانومواد را جهت بهبود رشد در ماهیان نشان می‌دهد.

۳- افزایش صید و برداشت ماهی

در زمینه صید و صیادی هم از فناوری نانو در ساخت طعمه‌های خاص ماهیگیری استفاده می‌شود. طعمه‌های سنتی تنها در یک جهت نور را منعکس می‌کنند؛ اما این طعمه‌های خاص ماهیگیری برای جلب توجه و فریب ماهیان طراحی و استفاده می‌شوند. بنابراین ساخت طعمه‌های مخصوص که با رنگ‌های نانویی پلی‌ایمیدی (Polyimide) پوشیده شده‌اند، برای افزایش میزان صید آبزیان از جمله ماهیان ضروری است. این طعمه‌های مخصوص می‌توانند نور را در جهت‌های مختلفی منعکس کرده و احتمال صید ماهی را در مقایسه با طعمه‌های معمولی به میزان قابل توجهی افزایش دهند (Rather *et al*. 2011; Bhattacharjee *et al*., 2023).

٤- مهندسی شیلات و آبزی‌پروری

پرورش ماهی در قفس با مشکلاتی از جمله مقاومت کم قفس، امواج سهمگین، خوردگی اسکلت قفس، املاح دریایی و غیره روبه‌رو است. در مهندسی آبزی‌پروری، هر ماده‌ای که بتواند استحکام قفس ماهی را بدون افزودن وزن اضافی افزایش دهد، مفید خواهد بود. از این‌رو، استفاده از فناوری نانو مانند نانولوله‌های کربنی (CNTs) در تولید قفس‌های جدید قابل توجه است (Chae and Kumar, 2006; Chang *et al*., 2010). در واقع نانو مواد به صنایع و تجهیزات مختلف ماهیگیری جهت افزایش استحکام و طول عمر با مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی افزوده می‌شوند. انتظار می‌رود سیستم‌های آبزی‌پروری مانند قفس‌ها، قایق‌ها، و مخازن ساخته شده با استفاده از مواد نانو دارای استحکام بیش‌تر، وزن سبک و ویژگی‌های ضدرسوب یا ضدخوردگی باشند که در کنار مزایای زیست‌محیطی و

جدول ۱- فواید برخی از نانومواد جهت بهبود رشد در ماهیان

نانومواد	گونه ماهی	عملکرد	منابع
نانوذرات طلا	تیلاپیای نیل (*Oreochromis niloticus*)	افزایش فعالیت کاتالاز در آبشش، سطح پراکسیداسیون لیپیدی (LPO) در کبد و لاکتات دهیدروژناز (LDH) در بافت‌های تیلاپیا	Shine *et al*., 2018
نانوذرات اکسید روی	*Labeo rohita*	اثرات نانوذرات اکسید روی به‌عنوان یک افزودنی در جیره، نشان‌دهنده‌ی بهبود بیش-تر رشد و عملکردهای متابولیکی در ماهی بود. فعالیت آنزیم‌های بیوشیمیایی، خونی و گوارشی نیز با غلظت‌های مختلف ZnONPs به‌طور قابل توجهی افزایش یافت.	Thangapandiyan and Monika, 2020
نانوذرات آهن	کپور معمولی (*Cyprinus carpio*)	استفاده از نانوذرات آهن و پروبیوتیک لاکتوباسیلوس به‌عنوان مکمل تغذیه‌ای توانست برخی از عوامل بیوشیمیایی در ماهی کپور را بهبود بخشد.	Ziaei-nejad *et al*., 2021
نانوذرات کیتوزان	روهو استوایی (*Labeo rohita*)	افزودن نانوذرات کیتوزان به جیره به میزان ۱ گرم بر کیلوگرم با توجه به بهبود وضعیت سلامتی و مقاومت به بیماری و درصد بقای بالا در برابر *Aeromonas hydrophila* در ماهی روهو استوایی اثر مفیدی داشت.	BT *et al*., 2022
نانوذرات سلنیوم	تیلاپیای نیل (*Oreochromis niloticus*)	مکمل Se-Nps به میزان ۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم عملکرد رشد و کیفیت گوشت را در ماهی تیلاپیای نیل افزایش داد و می‌تواند یک ریز مغذی بالقوه محرک رشد در آبزی-پروری باشد.	Dawit Moges *et al*., 2022
نانوذرات مس (Cu-NPs) و ویتامین C	قزل‌آلای رنگین‌کمان	مکمل‌های Cu-NPs و ویتامین C به‌طور قابل توجهی مقاومت در برابر پاتوژن‌ها را افزایش داده و منجر به کنترل عفونت در ماهی قزل‌آلای رنگین کمان شدند. همچنین عملکرد رشد، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و در نتیجه سلامت ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان افزایش یافت.	Delavari *et al*., 2022

اقتصادی، دوام و سهولت عملیاتی را فراهم می‌کنند، به‌ویژه زمانی که تقاضاهای کافی در مقیاس بزرگ ایجاد و عرضه می‌شود (Muruganandam *et al*., 2019). از طرف دیگر، آبزی‌پروری در بعضی مناطق، با مشکلاتی از جمله تخلخل بیش‌تر خاک‌ها و زمین‌ها، نشت و مشکلات ناشی از اتلاف آب و در نتیجه با هزینه‌های بالایی برای پرورش ماهی رو به‌رو است که بهره‌برداری و بازده اقتصادی ضعیف و نگرانی‌های زیست‌محیطی را به‌دنبال دارد. بیان شده است که توسعه‌ی نانو مواد در ترکیب با درزگیرهای موجود، می تواند تخلخل خاک را کاهش دهد و درنتیجه به حفظ آب یا بهبود ظرفیت نگهداری آب در استخرهای خاکی کمک کند. به‌عنوان مثال نانو مواد مانند نانوسیلیس، زئولیت و نانورس می‌توانند به‌عنوان مصالح ساختمانی همراه با ملات سیمان معمولی برای استحکام و دوام ساخت و ساز در سیستم‌های

آبزی‌پروری مانند استخرها و مخازن ماهی استفاده شوند (Quercia and Brouwers, 2010).

۵- کنترل رسوب زیستی و مدیریت حوضچه‌ها

رسوب زیستی ناشی از حمله باکتریایی می‌تواند از طریق عمل نانوذرات مختلف که به‌عنوان اکسیدهای اصلی فلزات عمل می‌کنند، برهم‌کنش داشته باشد. گاهی اوقات، این رسوب زیستی به‌دلیل تجمع شدید سایر آلاینده‌ها در آب مانند فلزات سمی در آب که در نهایت منجر به مرگ بسیاری از ماهیان و سایر موجودات ساکن آب می‌شود، خطرناک‌تر به‌نظر می‌رسد. با بهبود کنترل بیماری، فرمولاسیون تغذیه و کنترل رسوب زیستی، نانوفناوری می‌تواند تولید آبزی‌پروری و پرورش ماهی و میگو را بهبود بخشد (Melo and Bott, 1997). رسوب زیستی در آبزی‌پروری داخلی منجر به گرفتگی شبکه‌ها، افزایش تنش و در نتیجه تأخیر در رشد آبزیان می‌شود. لایه‌های موجود در محیط‌های آبی مستعد تشکیل میکروارگانیسم‌هایی به اشکال مختلف مانند باکتری‌ها و دیاتوم‌ها هستند که بیوفیلم‌ها را تشکیل می‌دهند و متعاقباً ته‌نشینی ماکروارگانیسم‌ها را تسهیل می‌کنند که منجر به رسوب زیستی می‌شود (Ashraf and Edwin, 2016). رسوب زیستی باکتری‌های ناخواسته (به‌عنوان بیوفیلم)، بی‌مهرگان (صدف‌ها و بارناکل‌ها) و جلبک‌ها (جلبک‌های دریایی و دیاتوم‌ها) را می‌توان با پوشش یا رنگ‌آمیزی نانوساختارها از طریق ترکیب نانوذرات اکسید فلزی مانند ZnO، CuO و SiO_2 پایش و کنترل کرد. این عمل را می‌توان با ایجاد یک سطح ضدرسوب مؤثر و افزایش کارایی کنترل ضدرسوب انجام داد (Rajesh Kumar *et al*., 2008; Handy, 2012). این پوشش ضدرسوب می تواند در شبکه‌های ماهیگیری و آبزی‌پروری، و در مواد ضدباکتری برای مخازن آبزی‌پروری استفاده شود. برای به حداکثر رساندن بازده‌ی آبزی‌پروری، تورهای قفس و سایر لایه‌های حساس در آبزی‌پروری داخلی باید به‌طور موثر از رسوب زیستی محافظت شوند. Ashraf و همکاران (۲۰۲۰)، روشی را برای جلوگیری از رسوب زیستی در شبکه‌های قفس پلی‌اتیلن با استفاده از پلی‌آنیلین (Polyaniline) و نانوذرات اکسید مس گزارش کردند. پلی‌آنیلین در محل بر روی شبکه‌های پلی‌اتیلن تهیه شد و سپس با نانوذرات اکسید مس ۰/۰۲ درصد تیمار شد. نانواکسید مس در ماتریس به‌عنوان یک منبع نقطه‌ای در بالای ابرهای الکترونی پلی‌آنیلین عمل می‌کند و از شروع اولیه تشکیل بیوفیلم و در نتیجه رسوب‌گیری جلوگیری می‌کند. به‌همین ترتیب، نانوذرات اکسید مس با هیدروژل پلی‌اتیلن گلیکول متاکریلات (Polyethylene glycol methacrylate) ترکیب شده است تا اثربخشی آن در برابر رسوب به‌عنوان یک پوشش در اکوسیستم آبی بررسی شود (Ashraf and Edwin, 2016). همچنین، یک دستگاه نانوفناوری تجاری موجود به نام نانوچک (NanoCheck)، می‌تواند برای تمیز کردن حوضچه‌های ماهی از طریق ذرات مبتنی بر لانتانیم (lanthanum) (اندازه ۴۰ نانومتر) استفاده شود که می‌تواند با جذب فسفات‌ها از آب از رشد جلبک‌ها جلوگیری کند (Rather *et al*., 2011).

٦- تصفیه آب و مدیریت محیط‌های آبی

نانوذرات به‌دلیل کاربردهایشان در حذف میکروب‌ها، مواد آلی، مواد شیمیایی معدنی، ترکیبات هالوژنه مانند آفت‌کش‌ها و فلزات سنگین و جلوگیری از رسوب زیستی در بدنه‌های آبی، به‌ویژه آبزی‌پروری داخلی در تصفیه پساب آبزیان محبوبیت پیدا کرده‌اند (Iwuozor *et al*., 2021). نانومواد به شکل مواد فعال مانند کربن یا آلومینا (Alumina) (اکسید آلومینیوم)، با افزودنی‌هایی مانند زئولیت و ترکیبات حاوی آهن، می‌توانند در کاربردهای آبزی‌پروری برای نگهداری بیوفیلم هوازی و بی‌هوازی برای حذف آمونیاک، نیتریت‌ها و آلاینده‌های نیترات استفاده شوند. به‌همین ترتیب، نانو ذره‌ی آهن می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای پاک‌سازی آلاینده هایی مانند تری کلرواتان، تتراکلرید کربن، دیوکسین‌ها و بی‌فنیل‌های پلی‌کلره به ترکیبات کربنی ساده‌تر که سمیت کم‌تری دارند، استفاده شود، بنابراین راه را برای به‌کارگیری فناوری نانو در آبزی‌پروری هموار می‌کند (Susitharan and Sindhu, 2021). نانوذرات اکسید روی (ZnO)، نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4)، نانوذرات اکسید قلع (TiO_2)، نانوذرات نقره (Ag)، نانولوله‌های کربنی (CNTs) برخی از گروه‌های مورد مطالعه نانو مواد برای استفاده در مدیریت کیفیت آب در آبزی‌پروری هستند (Ighalo *et al*., 2021). کاربرد نانوفناوری در آبزی‌پروری میگوی دریایی نشان داد که این دستگاه‌های نانوفناوری و فناوری‌های مبتنی بر نانو مانند نانو شبکه‌ها می‌توانند ویژگی‌های کیفی آب را با

افزایش pH آب و کاهش نیتریت و نیترات آب بهبود بخشند و قادر به کاهش نرخ تبادل آب، افزایش کیفیت آب و افزایش عملکرد و نرخ بقای ماهی و میگو باشند (Wen *et al*., 2003). هم‌چنین، نتایج تحقیق سالاری و همکاران (۱۴۰۰)، نشان داد که استفاده از نانو اکسید مس مغناطیسی شده در غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر به‌عنوان بهترین غلظت با کارایی بالا می‌تواند باعث بهبود شاخص‌های کیفیت فاضلاب آبزی-پروری شود.

در پژوهش Askari Hesni و همکاران (۲۰۲۰)، که با هدف بررسی کارایی نانوذرات اکسید آهن (از پیش آماده شده) در حذف آلاینده‌ها از پساب مزرعه‌ی ماهی (در یک سیستم آزمایشگاهی) انجام شد، گزارش شد که سطوح نیترات، نیتریت، فسفات، آمونیوم، TDS، TSS و BOD کاهش یافت. همچنین، گزارش شده است که عملکرد نانوذرات در مواردی که به‌طور هم‌افزایی با پلیمرهای زیستی مانند جلبک‌ها با بهره‌برداری از هیدرولوژی سطح ذاتی و توانایی فتوسنتزی آن‌ها استفاده می‌شود، به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد (Nasr-Eldahan et al., 2021). پژوهش Hesni و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که نانوذرات اکسید آهن و کلرلا ولگاریس (*Chlorella vulgaris*) می‌توانند به‌عنوان بیوراکتور (Bioreactor) در حذف فلزات سنگین و آلاینده‌های شیمیایی از پساب‌های آب بسیار مؤثر باشند. همچنین از نانوحسگرها برای بررسی دقیق انبارها و تمیز کردن حوضچه‌های ماهی با تجهیزات نانوفناوری می‌توان استفاده کرد. حسگر زیستی حساس ساخته شده براساس نانولوله‌های کربنی می‌تواند مقدار کمی میکروب‌ها از جمله باکتری‌ها، ویروس‌ها و انگل‌ها و همچنین فلزات سنگین آب و غذا را شناسایی کند (Jeong *et al*., 2005). از طرف دیگر، ایجاد و به‌کارگیری فناوری هوادهی با استفاده از نانوحباب‌ها، نتایج امیدوارکننده‌ای را در بهبود کیفیت آب در سیستم‌های آبزی‌پروری، افزایش سطح اکسیژن و ارتقای سلامت ماهی نشان داده است. این نانوحباب‌ها را می‌توان با استفاده از دستگاه‌های مختلف به سرعت تولید و در سطح آب توزیع کرد و میلیون‌ها نانوحباب اکسیژن را در حجم محدودی از آب ایجاد کرد تا تأثیر قابل‌توجهی بر تنظیم محیط‌های آبی داشته باشد (Devkota *et al*., 2024).

۷- کاربردهای دیگر فناوری نانو در آبزی‌پروری

علاوه بر کاربردهای ذکر شده نانوفناوری در خوراک و داروی آبزیان، بهبود ظاهر آبزیان، سالم و قوی شدن آن‌ها و جلوگیری از بیماری‌های مختلف؛ این تکنولوژی، فرآیند تسهیل تغییر جنسیت آبزیان را هم امکان‌پذیر می‌سازد (Ahmed *et al*., 2024). همان‌طور که اشاره شد؛ نانوفناوری در تولیدمثل، پرورش و حفاظت از تنوع زیستی آبزیان هم نقش دارد. استفاده از فناوری نانو در تکثیر و پرورش ماهیان محدود به تحویل داروها، هورمون‌ها، واکسن‌ها یا ژن‌ها می‌شود و هنوز هم دامنه وسیعی در این حوزه باقی‌مانده است که نیاز به بررسی دارد. علاوه براین، نانوفناوری در زمینه‌هایی از جمله حفظ و توسعه انجماد اسپرم ماهیان، تصویربرداری مایع منی، سورتینگ و مرتب‌سازی اسپرم، دستکاری پتانسیل تولیدمثلی، حفظ ژرم‌پلاسم (Germplasm) ماهیان و افزایش بازده تولیدمثلی آبزیان هم دخالت دارد (Bhat, 2023; Soltani *et al*., 2023). نتایج یک تحقیق نشان داد که نانوذرات سلنیوم می‌توانند سطوح گونه‌های فعال اکسیژن را در اسپرم گونه‌های *Onychostoma macrolepis* و *Schizothorax prenanti* در طول نگهداری در دمای ۴ درجه حفظ کنند و به‌عنوان یک افزودنی و مکمل بالقوه برای افزایش کیفیت اسپرم ماهیان ذخیره شده در شرایط آزمایشگاهی باشند (Zhu *et al*., 2023).

کاربردهای نانوفناوری در فرآوری محصولات شیلاتی

محصولات شیلاتی و ترکیبات زیست‌فعال حاصل از عمل آوری آبزیان می‌توانند به‌عنوان غذاهای کاربردی (Functional foods) و ترکیبات غذا–دارو (Nutraceutical compounds) نقش‌های بسیار مهمی را در توسعه سیستم‌های غذایی پایدار و تأمین سلامت بشر ایفا کنند (ربیع‌پور و باباخانی، ۱۴۰۲). علاوه براین، مصرف‌کنندگان به‌دنبال غذاهای سالم‌تر و غنی‌تر از مواد مغذی هستند که باعث افزایش مصرف ماهی و محصولات شیلاتی می‌شود (Vieira et al., 2019). با این حال حفظ تازگی و کیفیت محصولات شیلاتی همواره از دغدغه‌های محققان بوده است (رستم‌زاد و موسوی، ۱۳۹۵). تخریب کیفی از جمله تخریب پروتئین، اکسیداسیون چربی، تغییر رنگ، بی‌طعم و نرم شدن بافت به راحتی در فرآیند فساد

جدول ۲- کاربردهای نانومواد (نانوساختارها) در نگهداری محصولات شیلاتی

نانو مواد	گونه/ محصول	نتایج	منابع
پوشش ژلاتین حاصل از فلس ماهی کپور معمولی غنی‌شده با ۲ درصد اسانس پونه کوهی نانولیپوزوم شده و خالص	فیله ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان	زمان ماندگاری فیله‌های ماهی قزل‌آلا طی مدت ۱۶ روز نگهداری در دمای یخچال در مقایسه با تیمار شاهد به شکل معنی‌داری افزایش یافت. تیمار محتوی اسانس نانولیپوزوم شده خصوصاً در روزهای نخست، در تمامی آزمون‌های صورت گرفته بهتر از اسانس خالص بود که نشان می‌دهد نانولیپوزوم‌ها اساساً تا حدود یک هفته پس از اعمال پوشش کارایی و پایداری اثر ضدمیکروبی اسانس را افزایش دادند.	اجاق و همکاران (۱۳۹۶)
پوشش‌های نانوکیتوزان غنی شده با و بدون عصاره چای سبز (*Camellia sinensis L*)	ماهی گیش درخشان (*Carangoides coeruleopinnatus*)	نانوکیتوزان غنی شده با عصاره چای سبز، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ضدمیکروبی بالاتری را نسبت به نانوکیتوزان به تنهایی در طی دوره نگهداری نشان داد و همچنین جهت افزایش زمان ماندگاری و به تأخیر انداختن فساد ماهی گیش درخشان در طی زمان نگهداری در یخچال بهتر بود.	آلبوغبیش و خدا نظری (۱۳۹۸)
نانومولسیون مبتنی بر روغن‌های ضروری (essential oils) گیاهان دارویی (رزماری، لورل، آویشن و مریم‌گلی)	فیله‌های قزل‌آلای رنگین‌کمان	نانومولسیون حاصله؛ کیفیت ارگانولپتیک و زمان ماندگاری فیله‌های قزل‌آلای رنگین‌کمان را از ۱۴ روز به ۱۷ روز در طول نگهداری در یخ افزایش داد.	Ozogul *et al*., 2017
پوشش نانوکامپوزیت فوتوکاتالیستی نانو ذره‌ی نقره TiO_2 با تکنیک اکستروژن	تیلاپیای نیل (*Oreochromis niloticus*)	بهترین درصد نانو نقره در تیمار ۷ درصد گزارش شد و بسته‌بندی نانونقره، کیفیت و ماندگاری ماهی را بهبود بخشید.	Azari *et al*., 2020
نانوذرات ان‌کپسوله شده عصاره گیاه *Carum copticum* به همراه پوشش آلژینات	همبرگرهای قزل‌آلای رنگین‌کمان	استفاده از پوشش آلژینات با عصاره گیاه (*Carum copticum*) به شکل نانوذره باعث افزایش زمان ماندگاری همبرگرهای قزل‌آلای رنگین‌کمان ذخیره‌شده در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد شد.	Hashemi *et al*., 2023
نانوذرات عصاره هسته انگور در ترکیب با پوشش پولولان	فیله ماهی سالمون	پوشش‌های ایجاد شده توسط نانوذرات عصاره هسته انگور و پولولان، توانستند ماندگاری فیله ماهی سالمون را برای ۵ تا ۷ روز افزایش دهند.	Yajuan *et al*., 2023

ماهی و محصولات شیلاتی رخ می‌دهد (Çorapci, 2022). تمام این تغییرات، منجر به زیان اقتصادی برای تولیدکنندگان و باعث کاهش پذیرش و رضایت مصرف کنندگان می‌شود (Ebadi *et al*., 2019; Vieira *et al*., 2019). بنابراین، توسعه تکنیک‌های نگهداری مؤثر از جمله نانوفناوری برای جلوگیری از زوال کیفیت ماهی و محصولات شیلاتی ضروری است. در ادامه انواع مهم نانوساختارها (نانومواد) و کاربرد آن‌ها در فرآوری محصولات شیلاتی توضیح داده شده است.

نانوساختارها

در دنیای امروز، مصرف‌کنندگان به‌دلیل مزایای سلامتی، محصولات مبتنی بر نانوساختار را انتخاب می‌کنند. به‌عنوان مثال ترکیب نانوساختارها با بسته‌بندی فعال به‌عنوان یک روش نگهداری باعث افزایش پایداری و استحکام مکانیکی، بهبود فراهمی زیستی و کاهش میزان ضایعات مواد غذایی و غیره می‌شود (Manikandan and Min, 2023). نانوساختارهای پیشرفته، کاربردهای بالقوه‌ای در افزایش ماندگاری محصولات تازه یا فرآوری شده شیلاتی دارند. فیلم‌های پلیمری زیستی، با ترکیب نانومواد جدید، می‌توانند به‌عنوان پوشش‌های خوراکی برای حفظ مؤثر کیفیت محصولات شیلاتی عمل کنند. برای مثال، نانولوله‌ها، نانوژل‌ها، نانوکریستال‌های عامل‌دار، کارآیی خود را در محافظت از نمونه‌های ماهیان چرب در برابر اکسیداسیون و همچنین کاربرد عملی خود را با فعالیت‌های ضدمیکروبی خاص نشان داده‌اند (Cetinkaya and Wijaya, 2024). در ادامه انواع مهم نانوساختارها از جمله نانولوله‌ها، نانوکامپوزیت‌ها، نانومولسیون‌ها، نانولیپوزوم‌ها، نانوحسگرها، نانوبرچسب‌ها و نانوبارکدینگ و کاربرد آن‌ها مورد بحث قرار خواهند گرفت. جدول ۲، یک نمای کلی از کاربردهای

نانوساختارها را در نگهداری محصولات شیلاتی نشان می‌دهد.

۱- نانولوله‌ها

نانولوله‌های کربنی، ورقه‌های پیچیده شده‌ی گرافن هستند و ساختاری استوانه‌ای توخالی دارند. طول نانولوله‌های کربنی معمولاً از میکرومتر تا سانتی‌متر متغیر بوده و قطر آن‌ها بین ۱ تا ۳۰ نانومتر است و همچنین دارای رسانایی حرارتی بالا و استحکام کششی ۱۰۰ گیگا پاسکال هستند. نانولوله‌های کربنی به‌دلیل خصوصیات منحصر به‌فردشان، به‌طور گسترده در الکترونیک، محافظ الکترومغناطیسی، الکترودهای باتری، کاتالیزورها، ابرخازن‌ها و کامپوزیت‌ها استفاده می‌شوند (Naebe *et al*., 2010; Shirvanimoghaddam *et al*., 2018; Shirvanimoghaddam *et al*., 2019). علاوه بر نانولوله‌های کربنی، نانولوله‌های پروتئینی هم ساختارهای لوله‌ای توخالی با انتهای باز هستند که از طریق خودآرایی زنجیره‌های پلی‌پپتیدی تشکیل شده‌اند (Okamoto *et al*., 2001). خواص الکترونیکی و مولکولی پروتئین‌ها، مشخصه‌های محصول نهایی را تعیین می‌کنند (Fukasaku *et al*., 1998). این نانولوله‌ها را می‌توان با استفاده از خواص آن‌ها به‌عنوان قوام‌دهنده برای افزایش یکپارچگی ماتریکس مواد غذایی در محصولات مختلف شیلاتی استفاده کرد. نانوحفره‌ها را می‌توان برای محصور کردن انواع مولکول‌های غذایی مورد استفاده قرار داد (Graveland-Bikker *et al*., 2004). در یک پژوهش، از نانولوله‌های هالویزیت ((HNTs) (Halloysite nanotubes)) به‌عنوان نانوحامل در ترکیب با سیترال (Citral) به‌عنوان یک عامل ضدمیکروبی و میریستین (Myricetin) جهت نظارت هوشمند بر تازگی و نگهداری مواد غذایی استفاده شد. نانولوله‌های حاصله، خواص آنتی‌اکسیدانی و ضدباکتریایی عالی و عملکرد حساس به pH داشته و روشی امیدوارکننده برای دستیابی به آزادسازی قابل کنترل مواد فعال بودند. همچنین یک برچسب هوشمند طبیعی با فرو بردن فیبر سلولزی در نانولوله‌ی هالویزیت–سیترال–میریستین (Cit-HNTs-Myr) تهیه شد که ماندگاری میگو را افزایش داد و اطلاعات تازگی را برای گوشت میگو فراهم کرد. در واقع این نانولوله‌های هالویزیت، تا زمانی که عملکرد حساس به pH دارند؛ برچسب‌ها را مجبور می‌کنند که آزادسازی سیترال را کنترل کنند (Li *et al*., 2024).

نانولوله‌های کربنی همچنین به‌دلیل خواص منحصر به فرد متعدد، در زمینه‌های مختلف از جمله در تشخیص نمونه‌های شیلاتی و محیطی، کاربردشان در حسگرهای زیستی (به‌عنوان مثال، آنزیم‌ها و مولکول‌های زیستی) و غیره هم استفاده می‌شوند (Liu *et al*., 2014; Pundir *et al*., 2021). به‌طور کلی این نانولوله‌ها به دو دسته تک‌جداره (Single-walled) و چندجداره (Multi-walled) تقسیم می‌شوند. نانولوله‌های کربنی چندجداره، مزایای منحصر به‌فردی در رسانایی، هدایت حرارتی و استحکام مکانیکی داشته و دارای سطح ویژه بالا و چگالی کم هستند (Chalmpes *et al*., 2019; Patila *et al*., 2020). در یک تحقیق، یک آرایه حسگر گاز مبتنی بر کوارتز کریستال میکروبالانس ((QCM) (Quartz crystal microbalance)) اصلاح شده با چهار نانومواد مبتنی بر کربن مانند اکسید گرافن (Graphene oxide)، مکسین‌ها (Mxenes)($Ti_3C_2T_x$)، نانولوله‌های کربنی چند جداره هیدروکسیله ((HMWCNTs) (Hydroxylated multi-walled carbon nanotubes)) و اکسید گرافیت آلکین (Graphite oxide alkyne) برای تشخیص تری‌متیل آمین ((Trimethylamine)(TMA))، دی‌متیل آمین ((Dimethylamine)(DMA))، فرمالدئید (HCHO) و آمونیاک (NH_3) به‌ترتیب در گوشت ماهی آزاد ایجاد شد. مواد مبتنی بر کربن دارای مزایای سطح ویژه بالا و پایداری بالا هستند، بنابراین پتانسیل بالایی در جذب گاز دارند. مشاهده شد که حسگرهای QCM اصلاح شده با چهار ماده مبتنی بر کربن؛ حساسیت، گزینش‌پذیری و تکرارپذیری خوبی نسبت به گازهای هدف مربوطه نشان می‌دهند و برای تجزیه و تحلیل تازگی نمونه‌های ماهی آزاد استفاده می‌شوند (Chen *et al*., 2023).

۲- نانوکامپوزیت‌ها

با توجه به تقاضای مصرف‌کنندگان برای دسترسی به مواد غذایی با کیفیت بالا و نگرانی‌های ناشی از مصرف نگهدارنده‌های مصنوعی و نیز نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از تجمع پلیمرهای مصنوعی، استفاده از پوشش‌های زیست‌تخریب‌پذیر با خواص آنتی‌اکسیدانی و ضدباکتریایی بالا می‌تواند جایگزین مناسبی باشد (رستم‌زاد و زکی‌پور،

۱۳۹۹). به‌علاوه، می‌توان گفت که یکی از روش‌های جلوگیری از فساد (واکنش‌های بیوشیمیایی و متابولیسم میکروبی) محصولات شیلاتی، استفاده از پوشش‌های خوراکی مبتنی بر پلیمرهای زیستی جهت نگهداری این محصولات است (Yu *et al*., 2019). بیوپلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر مانند کلاژن، ژلاتین، کیتین، کیتوزان، آلژینات، آگار و کاراژینان و دیگر مواد زیستی از جمله زیست پلیمرهای مقرون به‌صرفه و در دسترس هستند که خواص فراوانی جهت استفاده به‌عنوان پوشش و بسته‌بندی محصولات غذایی دارند (Rabiepour *et al*., 2022). علاوه براین تحقیقات متعددی هم با هدف بررسی اثرات پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر و عصاره‌های گیاهی بر زمان ماندگاری محصولات شیلاتی انجام شده است که منجر به حفظ کیفیت مطلوب این محصولات شده‌اند (Rostamzad *et al*., 2019). با این حال به‌نظر می‌رسد که ترکیب نانوفناوری و پلیمرهای زیستی در تولید پوشش‌های نانویی، راهی بسیار مؤثر در نگهداری طولانی‌مدت محصولات شیلاتی باشد.

همان‌طور که اشاره شد، نانوفناوری را می‌توان در محصولات شیلاتی جهت نگهداری و به تأخیر انداختن فساد آنزیمی و میکروبی به‌عنوان یک روش حفاظت و بسته‌بندی برای اطمینان از ایمنی مواد غذایی استفاده کرد. Chang و همکاران (۲۰۱۰) در مقایسه با اثربخشی کیتوزان و پوشش آن بر روی فیله ماهی کپور نقره‌ای (*Hypophthalmicthys molitrix*) در یخچال در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد تأیید کردند که نانوکیتوزان، یک عامل ضدباکتری بسیار مؤثر است. در پژوهش Arfat و همکاران (۲۰۱۷)، فیلم‌های بیونانوکامپوزیت براساس ژلاتین پوست ماهی و نانوذرات فلزی نقره–مس (NPs Ag-Cu) توسعه داده شد. در نهایت مشخص شد که فیلم‌ها دارای خواص مکانیکی بهبود یافته و فعالیت ضد باکتریایی بالایی در برابر باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی هستند. در مطالعه‌ای دیگر، تأثیر کاهش غلظت اسید استیک بر فرمولاسیون نانوکیتوزان به‌عنوان نگهدارنده ماهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از این بود که غلظت بالاتر اسید استیک باعث کاهش اندازه ذرات کیتوزان و مهار رشد باکتری بیش‌تر می‌شود. غلظت بهینه اسید استیک در تولید نانو کیتوزان ۰/۴۳ درصد بود و توانست از رشد باکتری‌ها بر روی فیله تیلاپیا جلوگیری کند و حتی زمانی که فیله تیلاپیا تا ۲۵ دقیقه در محلول نانوکیتوزان خیسانده شده بود، باعث پذیرش خوب مصرف‌کننده شد (Winayu *et al*., 2019).

نانوکامپوزیت‌ها را می‌توان به‌عنوان پلیمرهای زیستی ترکیب‌شده با نانو تقویت‌کننده‌ها از جمله غیررس، نانوذرات فلزی، نانولوله‌های کربنی و میکروفیبریل‌های سلولزی که به‌دلیل نسبت سطح به حجم بالا، دارای فعالیت ضدباکتریایی مؤثر هستند، شناسایی کرد. علاوه بر این، ابعاد نانو کامپوزیت‌ها، فعالیت سطحی آن‌ها را افزایش می‌دهد و در نتیجه فعالیت باکتری‌کشی آن‌ها را در مقایسه با ابعاد بزرگترشان افزایش می‌دهد (Duan *et al*., 2008; Rhim *et al*., 2013). بهبود ویژگی‌های ساختاری و زیستی نانوکامپوزیت‌ها باعث محبوبیت آن‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی شده است. نانو دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) دارای توانایی ضدباکتریایی قوی‌ای است و می‌تواند پاتوژن‌های محصولات شیلاتی را در شرایط آزمایشگاهی مهار کند (Noman *et al*., 2019). به‌عنوان مثال، Noori Hashemabad و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که ترکیب پرتودهی گاما با بسته‌بندی نانوکامپوزیت TiO_2 می‌تواند اثرات ضدعفونی‌کننده‌ای را روی فیله ماهی *Oncorhynchus mykiss* نشان دهد. در تحقیق آن‌ها زمان ماندگاری فیله‌های *O. mykiss* ذخیره شده در دمای ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد با تیمار ترکیبی نانوکامپوزیت TiO_2 و پرتودهی (۳ کیلوگری) بدون تعیین ویژگی‌های غذایی و کیفیت حسی آن‌ها افزایش یافت. Mizieli-nska و همکاران (۲۰۱۸)، اثرات بسته‌بندی حاوی پلی‌لیزین (Poly-lysine) و نانو اکسیدروی را بر روی بافت و خلوص میکروبی فیله ماهی کاد (*Gadus morhua*) مقایسه کردند. نتایج نشان داد که کم‌ترین اتلاف آب و کاهش چسبندگی در نمونه‌های ماهی کاد ذخیره شده در پوشش‌هایی از جمله فیلم‌های پلی‌اتیلن با نانوذرات اکسیدروی مشاهده شد. همچنین تجزیه و تحلیل میکروبی نشان داد که بسته‌بندی حاوی نانواکسید روی در مهار باکتری‌های روان‌گردان و مزوفیل در مقایسه با بسته‌بندی‌های حاوی پلی‌لیزین مؤثرتر است. هنگامی که نانوکامپوزیت‌ها با پلیمرهای خالص مقایسه می‌شوند، نانوکامپوزیت‌ها خواص مکانیکی، حرارتی، نوری و فیزیکی–شیمیایی بهتری از خود نشان می‌دهند. این خواص شامل افزایش استحکام، مقاومت حرارتی و کاهش

جدول ۳- استفاده از نانوکامپوزیت‌ها در نگهداری محصولات شیلاتی

گونه یا محصول	نانوپوشش استفاده شده	نتایج	منابع
فیلم زیست‌تخریب‌پذیر کاراژینان	نانورس	تایج حاکی از این بود که در اثر افزودن نانورس، نفوذپذیری به بخار آب به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و میزان استحکام فیلم‌ها بهبود یافت. به‌طور کلی می‌توان گفت افزودن نانورس تا غلظت ۳٪ موجب بهبود کیفیت فیلم‌های تولیدی شده و استفاده از فیلم مذکور جهت بسته‌بندی مواد غذایی فاسدشدنی پیشنهاد می‌شود.	لسانی و همکاران، ۱۳۹۹
فیلم پروتئین میوفیبریلار ماهی (FMP)	نانورس مونت موریلونیت (MMT) و ترانس گلوتامیناز میکروبی (MTGase)	ترکیب MMT و MTGase در فیلم پروتئین میوفیبریلار ماهی به‌طور قابل‌توجهی افزایش آب، نفوذپذیری بخار آب، حلالیت و خواص فیزیکی و مکانیکی فیلم FMP را بهبود بخشید. همچنین اثر ترکیبی خاک رس و MTGase به‌طور قابل توجهی استحکام کششی و ازدیاد طول نانوکامپوزیت FMP را بهبود بخشید.	Rostamzad *et al*., 2016
سوریمی ماهی	نانوکیتوزان	پس از ۹ روز نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های پوشش داده شده با نانوپوشش کیتوزان، اکسیداسیون چربی را به تاخیر انداختند و فعالیت ضدمیکروبی و افزایش زمان ماندگاری را در مقایسه با نمونه‌های شاهد به نمایش گذاشتند.	Hajji *et al*., 2019
فیله‌های ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان (*Oncorhynchus mykiss*)	پوشش خوراکی نانوکامپوزیتی غنی شده با روغن ضروری *Foeniculum vulgare*	استفاده از فناوری نانو منجر به بهبود خواص آنتی‌اکسیدانی و ضدمیکروبی پوشش‌ها شد. با توجه به نتایج، نانوپوشش حاوی ۲ درصد روغن ضروری رازیانه می‌تواند در کارخانه‌های بسته‌بندی گوشت جهت افزایش زمان ماندگاری استفاده شود.	Sayyari *et al*., 2021

نفوذپذیری در برابر گازها است و با افزودن مقادیر کمی نانوذرات به‌دست می‌آید (Rostamzad, 2020). نتایج تحقیق دیگری حاکی از این بود که ترکیب پوشش‌های نانوکامپوزیت کیتوزان-نانورس همراه با اسیدگالیک با خاصیت ضدباکتری ویژه باعث افزایش زمان ماندگاری فیله‌های ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان به‌مدت ۵ روز نسبت به نمونه شاهد در طول نگهداری در یخچال می‌شود و همچنین فیله‌های تیمار شده خواص حسی مناسبی از خود نشان می‌دهند (Javadifard *et al*., 2023).

پژوهشی دیگر به‌منظور بررسی خواص ضدمیکروبی افزودن اسانس آویشن به نانوکامپوزیت‌های کاراژینان-رس مورد ارزیابی قرار گرفت. اضافه نمودن ۳٪ نانورس به فیلم تولیدی، بازدارندگی خوبی را در برابر رشد باکتری‌های *Escherichia coli* و *Listeria monocytogenes* ایجاد کرد و در زیر دیسک‌های فیلم، هیچ گونه باکتری رشد نکرد و هاله‌ای هم در اطراف دیسک مشاهده نشد. اما با افزودن اسانس آویشن به محلول فیلم‌ساز، بازدارندگی فیلم‌های تولید شده در برابر باکتری‌ها خصوصا *L. monocytogen* افزایش معنی‌داری را نشان داد و در اطراف فیلم نیز هاله‌ای عاری از باکتری ایجاد شد (رستم‌زاد و همکاران، ۱۳۹۷). جدول ۳ استفاده از نانوکامپوزیت‌ها را در نگهداری محصولات شیلاتی نشان می‌دهد.

۳- نانوامولسیون‌ها

فناوری مبتنی بر نانوامولسیون در صنایع غذایی به‌ویژه در طراحی سیستم‌های تحویل ترکیبات زیست‌فعال به سرعت در حال توسعه است. گنجاندن مواد فعال زیستی در سیستم کپسوله‌سازی نانوامولسیون‌های غذایی می‌تواند پایداری آن‌را

بهبود بخشد، آزادسازی آن را کنترل کند و از رشد و تولیدمثل میکروبی جلوگیری کند. این نانوامولسیون‌ها می‌توانند از طریق کاهش بار میکروبی و تأخیر در اکسیداسیون پروتئین‌ها و لیپیدها، از فساد ماهی جلوگیری کنند و در نتیجه خصوصیات کیفی ماهی را حفظ کنند. علاوه بر این، نانوامولسیون‌ها را می‌توان با ترکیب با بسته‌بندی برای افزایش تخریب میکروبی، حفظ ارزش غذایی و افزایش زمان ماندگاری محصولات شیلاتی استفاده کرد (Zhao *et al*., 2023). نانوامولسیون‌ها از مخلوط کردن دو مایع غیرقابل اختلاط تولید می‌شوند که توسط یک سورفکتانت مانند نشاسته اصلاح‌شده، مایع و پروتئین تثبیت می‌شوند و اندازه قطرات متوسط آن‌ها بین ۲۰ تا ۲۰۰ نانومتر می‌باشد. اندازه کوچک، سطح بالاتری را به‌ازای واحد جرم فراهم می‌کند و در نتیجه پایداری و خواص فیزیکوشیمیایی برجسته نانوامولسیون‌ها را ارائه می‌دهد (Otoni *et al*., 2016). نتایج تحقیق Sharifimehr و همکاران (۲۰۱۹)، در بررسی اثربخشی نانوپوشش زیستی (Bio-nanocoating) حاوی آلوئه‌ورا (Aloe vera) و اوژنول (Eugenol) (روغن میخک) بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی میگوی صورتی سرخ شده نشان داد که نانوامولسیون حاوی ۲ درصد آلوئه‌ورا و ۳ درصد اوژنول، بهترین فرمول جهت پوشش انتخابی می‌باشد و هم‌چنین نانوپوشش زیستی به‌طور قابل‌توجهی اتلاف پخت و جذب روغن را در طی سرخ‌کردن کاهش داد و اکسیداسیون میگوهای صورتی سرخ‌شده را در طول ذخیره‌سازی منجمد به تأخیر انداخت.

هم‌چنین در یک پژوهش مشخص شد که نانوامولسیون های ضدباکتری روغن آویشن با قطر متوسط ۱۶۳ نانومتر و ۲۱۹ نانومتر می‌توانند بر فساد میکروبی فیله‌های قزل‌آلای رنگین‌کمان غلبه کرده و به‌طور مؤثر باکتری‌های گرم منفی را که عمدتاً در فیله‌های ماهی وجود دارند، مهار کنند (Meral *et al*., 2019). حسینی و همکاران (۱۳۹۹)، در پژوهشی اثر نانوامولسیون مبتنی بر روغن آفتابگردان را بر روی کیفیت و ماندگاری فیله‌ی ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان طی ۱۲ روز نگهداری در یخچال مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست آمده نشان داد که پوشش‌دهی فیله‌ها با نانوامولسیون روغن آفتابگردان بر عمدهٔ شاخص‌های مورد بررسی تأثیر معنی‌داری داشت و موجب حفظ بهتر فیلهٔ ماهیان مورد بررسی در مقابل شرایط فساد خواهد شد. نتایج بررسی حمزه‌ای و رویانی (۱۴۰۲)، نشان داد که استفاده از نانوامولسیون حاوی ۲ درصد اسانس گل‌پر، باعث تأخیر در فساد ناگت‌های میگو در طی ۱۵ روز نگهداری در دمای یخچال شد و توانست ماندگاری ناگت میگو را نسبت به شاهد و سایر تیمارها تا ۳ روز افزایش دهد. در تحقیقی دیگر، تولید نانوامولسیون روغن ماهی حاوی امگا ۳ و ارزیابی پایداری آن در دماهای مختلف، مورد بررسی قرار گرفت. نانوامولسیون تولید شده بهترین پایداری را در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نشان داد. هم‌چنین، غلظت بهینه ۴ درصد از نانوامولسیون امگا ۳، دارای پتانسیل ضدباکتریایی بر علیه دو باکتری *Staphylococcus aureus* و *Pseudomonas aeruginosa* بود (غفوری و همکاران، ۱۴۰۱). جدول ۴ استفاده از نانوامولسیون‌ها را در نگهداری محصولات شیلاتی نشان می‌دهد.

٤- نانولیپوزوم‌ها

نانولیپوزوم‌ها به‌طور گسترده در زمینه‌های مختلف از جمله کپسوله‌سازی، کنترل رهاسازی مواد غذایی و هم‌چنین بهبود فراهمی زیستی، پایداری و ماندگاری مواد حساس به‌کار گرفته شده‌اند (Reza Mozafari *et al*., 2008). نانولیپوزوم‌ها در بخش مواد غذایی برای ارائه عطر، طعم مواد مغذی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و اخیراً برای توانایی آن‌ها به‌عنوان ضدمیکروبی که می‌توانند در حفظ مواد غذایی در برابر آلودگی‌های میکروبی کمک کنند، مورد تحقیق قرار گرفته‌اند (Khorasani *et al*., 2018). در یک پژوهش، روغن ضروری آویشن شیرازی (*Zataria multiflora Boiss*) به‌دلیل مشکلاتی از جمله حساسیت به اکسیداسیون، پراکندگی کم در فاز آبی و تأثیر بر طعم غذای ترکیبی توسط Bahramian و همکاران (۲۰۱۸)، در نانولیپوزوم کپسوله شد و تأثیر آن جهت افزایش زمان ماندگاری فیله *Oncorhynchus mykiss* مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ادغام فیله با ۴ درصد روغن ضروری آویشن شیرازی نانولیپوزومی منجر به بالاترین امتیاز حسی، کم‌ترین درجه اکسیداسیون و بیش‌ترین زمان ماندگاری فیله ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان شد. Guan همکاران (۲۰۱۶)، از نانولیپوزوم‌ها به‌عنوان یک حامل برای بهبود اثربخشی (عامل آنتی‌اکسیدانی و ضدمیکروبی) اپی‌گالوکاتچین-۳-گالات ((Epigallocatechin-3-gallate) (EGCG))

جدول ٤- استفاده از نانوامولسیون‌ها در نگهداری محصولات شیلاتی

گونه یا محصول	نانوامولسیون‌ها استفاده شده	نتایج	منابع
ماهی سی‌باس پرورشی و ماهی سیم دریایی	نانو امولسیون بر پایه روغن آفتابگردان	مقادیر پارامترهای شیمیایی و مهار رشد باکتری در سرتاسر دوره ذخیره-سازی کاهش یافت و ماندگاری ماهیان، ۱ یا ۲ روز در مقایسه با تیمار کنترل افزایش یافت.	Yazgan *et al*., 2017
فیله‌های ماهیان خاویاری بلوگا	نانوامولسیون‌های مبتنی بر صمغ عناب	فیله‌های ماهیان خاویاری فرآوری شده کم‌ترین کاهش وزن و پخت، pH و تغییرات بافت و رنگ، زوال، اکسیداسیون چربی و رشد میکروبی را در طول ذخیره‌سازی نشان دادند.	Gharibzahedi and Mohammadnabi, 2017
میگوی خشک شده (*Macrobrachium equidens*)	پوشش فعال سبز از کیتوزان (C) ترکیب شده با نانو امولسیون روغن دارچین (CONE)	در طول ۶ هفته نگهداری، C+CONE به‌طور قابل توجهی از رشد باکتری‌ها جلوگیری کردند، اکسیداسیون لیپیدها و تولید آمین‌های فرار را در میگوی خشک شده به تاخیر انداختند.	Jitpasutham *et al*., 2024
میگو (*Penaeus semisulcatus*)	نانو امولسیون زعفران	نانوامولسیون زعفران ۳ یا ۵ درصد می‌تواند ماندگاری میگو *P. semisulcatus* را که در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و ۸ درجه سانتی‌گراد که نگهداری می‌شود، افزایش دهد.	Pourmoghadam *et al*., 2023

استفاده کردند. نانولیپوزوم‌های EGCG تهیه‌شده برای نگهداری ماهی کاد در طول یخچال مؤثرتر و مناسب‌تر بودند.

در یک تحقیق، ایجاد یک سیستم نانولیپوزومی فسفولیپید خوراکی با پپتیدهای فعال زیستی مشتق شده از پروتئین هیدرولیز شده ماهی کپور معمولی (*Cyprinus carpio*) در پوشش کیتوزان توسط آنزیم آلکالاز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پوشش کیتوزان به میزان زیادی پایداری نانولیپوزوم‌ها را بهبود می‌بخشد. هم‌چنین ارزیابی فعالیت آنتی‌اکسیدانی با آزمون‌های DPPH و ABTS نشان داد که فعالیت مهارکنندگی رادیکال در نانولیپوزوم‌ها در نمونه‌های پوشش‌داده‌شده با کیتوزان و غیر پوشش‌داده‌شده، فعالیت بالایی دارد. در نهایت مشخص شد که کپسوله کردن پپتید زیست‌فعال در سیستم لیپوزومی می‌تواند یک رویکرد مفید برای کاربرد مستقیم پپتیدهای با پتانسیل آنتی‌اکسیدانی در محصولات غذایی باشد (Hasani *et al*., 2019). در پژوهش قوطوری و همکاران (۱۴۰۲)، مشخص شد که افزودن نانولیپوزوم‌های حامل روغن ماهی به همبرگر با چربی کاهش یافته در طول نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد یخچال، باعث افزایش قدرت نگهداری آب، بازده‌ی پخت و همچنین کاهش میزان کالری کل و پیشرفت روند اکسیداسیون پروتئین و چربی می‌شود و بافت و رنگ را بعد از فرآیند پخت بهبود می‌بخشد. علاوه براین، با افزودن نانولیپوزوم‌های حامل روغن ماهی به برگر گوشت، بالاترین امتیاز حسی از لحاظ بافت، طعم، بو، رنگ و پذیرش کلی حاصل شد. پوریوسف و همکاران (۱۴۰۰)، در یک مطالعه به این نتیجه رسیدند که تیمار حاوی نانولیپوزوم اسانس پونه ۲ درصد، در مقایسه با تیمارهای کنترل و سایر تیمارها، دارای بیش‌ترین تأثیر بر روی ویژگی‌های شیمیایی، میکروبی و حسی گوشت چرخ شده ماهی کپور نقره‌ای در طول نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و می‌تواند به عنوان یک افزودنی مناسب برای افزایش زمان

جدول ۵- استفاده از نانولیپوزوم‌ها در نگهداری محصولات شیلاتی

گونه یا محصول	نانولیپوزوم استفاده شده	نتایج	منابع
ماهی قزل‌آلا	پوشش خوراکی مبتنی بر صمغ زانتان همراه با نانولیپوزوم‌های اسانس *Litsea cubeba*	پوشش‌های فرموله شده توانست به‌عنوان یک رویکرد امیدوارکننده برای کنترل آلودگی *Vibrio. parahaemolyticus* و حفظ کیفیت ماهی قزل‌آلا استفاده شود.	Cui *et al*., 2022
برگرهای کپور معمولی در طول نگهداری در یخچال	نانولیپوزوم فیکوبیلی‌پروتئین جلبک قرمز (*Gracilaria gracilis*)	پتانسیل فیکوبیلی‌پروتئین زمانی که در لیپوزوم‌های پوشش داده شده‌ی کیتوزان محصور شد، بهبود یافت. برگرهای تیمار شده با نانولیپوزوم‌های ۵ درصد، کم‌ترین میزان اکسیداسیون لیپید و زوال میکروبی را در مقایسه با سایرین در طول نگهداری نشان دادند. با توجه به ارزیابی شیمیایی، میکروبی و حسی، ماندگاری همبرگر کپور معمولی در طول نگهداری در یخچال در نمونه‌های تیمار شده با فیکوبیلی‌پروتئین محصور شده به میزان ۲/۵ و ۵ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت.	Haghdoost *et al*., 2022
روغن ماهی	نانولیپوزوم‌های تولید شده از ماکروجلبک‌های قهوه‌ای و سبز (*Sargassum boveanum*، *Padina distromatica* و *Caulerpa sertularioides*)	مقادیر رنگ در نمونه‌های تیمار شده با نانولیپوزوم‌ها از پایداری بالاتری برخوردار بودند و نانولیپوزوم حاصله به‌طور موثر اکسیداسیون در روغن ماهی ذخیره شده در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد را به تأخیر انداخت.	Mousavipour *et al*., 2023

ماندگاری گوشت چرخ شده کپور نقره‌ای مطرح شود. جدول ۵، استفاده از نانولیپوزوم‌ها را در نگهداری محصولات شیلاتی نشان می‌دهد.

۵- نانوحسگرها (نانوسنسورها)

با توجه به افزایش ناگهانی در تقاضای مواد غذایی برای جمعیت رو به افزایش؛ افزایش حضور مواد تقلبی و سمی در اقلام غذایی موجود برای مصرف‌کنندگان افزایش یافته است. در این میان، نانوفناوری ممکن است به ما امکان توسعه‌ی نانوحسگرهایی را بدهد که می‌توانند به ما در تشخیص مواد تقلبی و سمی در مواد غذایی، به‌ویژه در کاربردهای آن‌ها برای کیفیت و امنیت غذا کمک کنند. آن‌ها را می‌توان در ترکیب حسگرهای طبیعی به‌کار برد که طرح ابزارهای سریع و حساس را برای ارزیابی جدید بودن و تشخیص ترکیبات حساسیت‌زا، سموم یا آلاینده‌های بیماری‌زا تقویت می‌کند (Gulati *et al*., 2022).

نانوحسگرها از نظر حساسیت بالا، نسبت سطح به حجم بالا، پاسخ سریع، نتایج قابل اطمینان‌تر، توانایی تشخیص مقادیر کم‌تر، هزینه کم، قابلیت حمل و انتخاب بالا نسبت به حسگرهای معمولی، کاملاً منحصر به‌فرد هستند (Chen and Yada, 2011; Omanović-Mikličanina and Maksimović, 2016). از طرف دیگر بیماران آلرژیک می‌توانند با مصرف محصولات غذایی در معرض ترکیبات آلرژی‌زا قرار گیرند. از این نظر، صنعت اقداماتی را برای حذف یا کاهش ترکیبات آلرژی‌زا در غذاهای فرآوری شده انجام داده است. دستگاه‌هایی مانند حسگرهای زیستی مرتبط با نانوذرات برای تعیین ترکیبات آلرژی‌زا ساخته شده‌اند. در میان نانومواد، نانوذرات طلا به‌دلیل سهولت سنتز، سطح ویژه‌ی بزرگ، رسانایی خوب و زیست‌سازگاری بیش‌ترین استفاده را دارند (Aquino and Conte-Junior, 2020).

جدول ٦- استفاده از نانوحسگرها (نانوسنسورها) در نگهداری محصولات شیلاتی

گونه یا محصول	نانوحسگر استفاده شده	نتایج	منابع
قزل‌آلای رنگین‌کمان (*Oncorhynchus mykiss*)	نانوحسگر الکتروریسی شده هالوکرومیک مبتنی بر پروتئین	نانوحسگر الکتروریسی شده هالوکرومیک مبتنی بر پروتئین برای نظارت بر تازگی ماهی قزل‌آلا با ترکیب رنگ آلیزارین در نانوالیاف الکتروریسی شده زین توسعه داده شد. نانوحسگر حاصله توانست تازگی ماهی را در زمان واقعی از طریق تغییر رنگ کنترل کند.	Aghaei *et al*., 2020
قزل‌آلای رنگین‌کمان (*Oncorhynchus mykiss*)	سنسور گاز مبتنی بر نانوسیم منفرد	حسگر گاز به کل نیتروژن اولیه فرار واکنش نشان داد و وضعیت تازگی نمونه‌های ماهی را در کم‌تر از ۳۰ ثانیه تشخیص داد. پاسخ سنسور در دماهای مختلف به خوبی با تعداد کل زنده (TVC) همبستگی داشت و نشان داد که این روش مناسبی (هر چند غیرمستقیم) برای اندازه‌گیری جمعیت باکتری در نمونه است.	Tonezzer *et al*., 2021
-	حسگر گاز دی‌متیل آمین مبتنی بر نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم	توسعه یک دستگاه حسگر گاز دی‌متیل آمین مبتنی بر نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم به عنوان روشی جدید، ساده، سریع و ارزان می‌تواند جهت تشخیص دی متیل آمین برای نظارت در زمان واقعی، تشخیص تازگی و کنترل کیفیت محصولات شیلاتی موثر واقع شود.	Galstyan *et al*., 2020

علاوه بر موارد گفته شده، بسیاری از مردم گزارش داده‌اند که به محصولات غذایی مختلف از جمله ماهی و سایر محصولات شیلاتی فرآوری شده، آلرژی دارند. بنابراین فناوری نانو برای حذف دقیق آلرژن‌های خاص از محصولات شیلاتی می‌تواند استفاده شود، بدون این‌که طعم یا ارزش غذایی آن‌ها به خطر بیافتد (Chirwatkar and Chhaba, 2018). امروزه سیستم‌های بسته‌بندی هوشمند صنعتی، به سرعت در حال ظهور هستند که امنیت غذایی را در سال‌های آینده در اولویت قرار خواهند داد. پیشرفت فناوری نانوحسگرها، گنجاندن نانوحسگرها در بسته‌بندی مواد غذایی، و ایجاد پیشرفت‌هایی در سیستم‌های بسته‌بندی هوشمند ((Intelligent packaging) (IP)) همگی برای پیشبرد امنیت غذایی حیاتی هستند. این سیستم بسته‌بندی نوآورانه به شناسایی، مدیریت، تجزیه و تحلیل، مستندسازی و ارتباط زنجیره تأمین کمک می‌کند (Chelliah *et al*., 2021). یک تحقیق نشان داد که یک حسگر گاز مقاومتی مبتنی بر نانوسیم تک اکسید قلع (One single tin oxide nanowire) می‌تواند درجه تازگی و فساد ماهی ماکرل را در دماهای مختلف نگهداری تشخیص دهد (Tonezzer, 2020). در یک بررسی دیگر، سنسور نانوکامپوزیت SnO_2–ZnO، مزایای گزینش‌پذیری بالا، حساسیت عالی، پایداری قوی و ویژگی‌های پاسخ/ بازیابی سریع را در تشخیص TMA در دمای ۳۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد نشان داد که می‌تواند برای تشخیص تازگی ماهی استفاده شود (Zhang and Zhang, 2008). هم‌چنین نتایج یک پژوهش نشان داد که فلوئوروگرافن (Fluorographene) می‌تواند به‌عنوان یک نانوحسگر امیدوارکننده در تشخیص فساد ماهی عمل کند (Rouhani, 2019). جدول ۶ ، استفاده از نانوحسگرها را در نگهداری محصولات شیلاتی نشان می‌دهد.

٦- نانوفناوری به‌عنوان برچسب‌گذاری و نانوبارکدینگ

علاوه بر تشخیص بیماری، پردازش زیستی نانو و نانوبارکد نیز در نظارت بر کیفیت محصول، مفید هستند. فرآیندهای بارکد برای تشخیص خاص واکنش‌ها با یک برچسب شناسایی مشخص و معین توسعه یافته‌اند (Fayaz *et al*.,

2021). برچسب‌ها به‌طور خودکار در هر فاصله‌ای برای ردیابی و همچنین به‌عنوان وسیله‌ای برای نظارت بر رفتار تغذیه ماهی و الگوهای متابولیسم شنا عمل می‌کنند (Rather *et al*., 2011). به‌عنوان مثال برچسب‌های شناسایی فرکانس رادیویی ((RFID)(Radio-frequency identification)) در بسته‌بندی هوشمند، معمولاً برای ردیابی و شناسایی محصولات استفاده می‌شوند. همچنین مدیریت بهتر و فرآیندهای زنجیره تأمین ساده‌تر، امکان ذخیره‌سازی جریان‌های متنوعی از اطلاعات مانند منبع محصول، پارامترهای محیطی و تاریخ انقضا را فراهم می‌کنند. چنین اطلاعاتی؛ قابلیت ردیابی مواد غذایی، تجزیه و تحلیل خطر و کنترل‌های پیشگیری مبتنی بر خطر ((HARPC) (Hazard Analysis and Risk-Based Preventive Controls)) و مدیریت زنجیره سرد در تعدادی از گروه‌های مواد غذایی بسیار فاسد شدنی، مدیریت تقاضا، و شناسایی سریع‌تر محصولات تولید شده از منبع آلوده یا فاسد را فراهم می‌کنند (Lee and Rahman, 2014; Littman, 2022). علاوه بر این، نانوتگ‌های RFID (RFID nanotags) دارای مزایای زیادی از جمله ظرفیت ذخیره‌سازی حافظه، شماره شناسایی محصول، قیمت، هزینه محصول، تاریخ تولید و ردیابی مکان محصول هستند. نانوبارکد در واقع یک دستگاه نظارتی متشکل از نوارهای فلزی حاوی نانوذرات است که در آن تغییرات در نوار، روش کدگذاری اطلاعات را فراهم می‌کند. نانوبارکد باعث می‌شود تا نظارت بر صنعت فرآوری و صادرکنندگان به‌راحتی انجام شود یا وضعیت تحویل محصول تا رسیدن به بازار و مراکز فروش پیگیری شود. علاوه بر این، دستگاه نانوبارکد همراه با سنسورهای نانو و DNA مصنوعی برچسب‌گذاری شده با پروب‌های کد رنگی، می‌توانند پاتوژن‌ها و عوامل بیماری‌زا را شناسایی کرده و تغییرات دما، نشت و غیره را کنترل کنند و در نتیجه کیفیت محصول را بهبود بخشند (Susitharan and Sindhu, 2021). به‌عنوان مثال نانوذرات مبتنی بر کیتوزان به‌عنوان بارکد و حسگرهای زیستی در برچسب‌گذاری و نظارت بر گوشت آبزیان و حیوانات کاربرد جالبی پیدا کرده‌اند. نانوکیتوزان‌های به‌دست‌آمده از پوسته سخت‌پوستان، زیست‌تخریب‌پذیر و زیست‌سازگار هستند و خواص عملکردی و تغذیه‌ای ارزشمندی را ارائه می‌کنند. سمیت کم آن‌ها به کاربردهای صنعتی متنوع در مدل‌های تحقیقاتی مختلف کمک می‌کند و می‌تواند استفاده از آن‌ها را در برچسب‌گذاری گوشت‌های تجاری حاصله از آبزیان و موجوداتی که به‌راحتی توسط منابع میکروبی در طول بسته‌بندی، ذخیره‌سازی و حمل و نقل آلوده می‌شوند، امکان‌پذیر کند. در این ظرفیت، نانوکیتوزان‌ها برای ردیابی و شناسایی تاریخ تولید و انقضای گوشت‌ها و ماهیان تجاری فروخته شده و همچنین تحویل آنتی‌اکسیدان‌ها و ضدمیکروبی‌ها در این محصولات غذایی بدون تأثیر بر قوام، ترکیب و خواص ارگانولپتیکی محصول استفاده می‌شوند (Ahuekwe *et al*., 2023).

اثرات مضر استفاده از نانوفناوری

اکثر نانومواد و نانوذرات مهندسی شده ((ENPs) (Engineered nanoparticles))، به‌طور گسترده به‌عنوان زیست‌سازگار و پایدار گزارش می‌شوند که کاربرد آن‌ها را در زمینه‌هایی مانند تصفیه آب، پزشکی و بیوتکنولوژی توضیح می‌دهد (Sidhu *et al*., 2022). با این حال کاربرد جهانی نانوذرات مهندسی شده در محصولات تجاری، صنعت و زمینه‌های مختلف، نگرانی‌هایی را در مورد ایمنی آن‌ها ایجاد کرده است. این نانوذرات ممکن است از طریق تخلیه فاضلاب صنعتی یا خانگی، به رودخانه‌ها و محیط‌های دریایی راه پیدا کرده و در نتیجه اکوسیستم را تحت تأثیر قرار دهند (Lee *et al*., 2022). در واقع در اثر استفاده‌ی بیش از حد از محصول اصلاح شده‌ی نانو، فرسایش و در نتیجه تخریب، این نانوذرات مهندسی شده به‌عنوان نانوزباله به محیط‌زیست از جمله هیدروسفر و اتمسفر آزاد می‌شوند و می‌توانند معیشت موجودات زنده را به چالش بکشند (Bundschuh *et al*., 2018). موجودات آبزی مانند فیتوپلانکتون‌ها و جلبک‌ها که منابع غذایی برای زئوپلانکتون‌ها (مصرف‌کنندگان اولیه)، ماهیان کوچک و سخت‌پوستان هستند؛ می‌توانند به عنوان منبعی از مواد مغذی، نانوذرات را از طریق هرم تغذیه به آبزیان بزرگ‌تر از جمله ماهیان (مصرف‌کنندگان ثانویه) انتقال دهند. نانوذرات مهندسی شده‌ی انباشته شده از طریق اثرات سمی خود می‌توانند رشد و تولیدمثل ماهیان را تغییر دهند و از این‌رو منابع مواد مغذی را کاهش دهند. همچنین آن‌ها از طریق رژیم ماهی به سطح تغذیه‌ای بعدی (انسان) منتقل می‌شوند و می‌توانند سلامتی انسان را به خطر بیاندازند (Lammel *et*

جدول ۷- اثرات مضر نانوساختارها بر روی انواع مختلف آبزیان

نانوساختار	گونه‌های ماهیان	بافت‌های هدف	نتایج	منابع
نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و نانوذرات نقره	کپور معمولی (*Cyprinus carpio*)	آبشش، کبد و روده	کاهش فاکتور وضعیت و شاخص کبدی و کاهش شدید افزایش وزن	Haghighat *et al*., 2021
نانولوله‌های کربنی چنددیواره	کپور معمولی (*Cyprinus carpio*)	بافت کبد	تغییرات وابسته به دوز در مورفولوژی پاتولوژیک بافت‌های کبدی، تغییرات فراساختاری به صورت تغییر شکل هسته‌ای، تراکم کروماتین، آرایش نامنظم شبکه آندوپلاسمی، واکوئل شدن میتوکندری و تخریب غشای میتوکندری، افزایش میزان آپوپتوز در سلول‌های کبدی.	Gao *et al*., 2023
نانوپلی‌استایرن (NP) و کادمیوم (Cd)	سخت‌پوست (*Eriocheir sinensis*)	روده	استرس اکسیداتیو، عدم تعادل هموستاز میکروبیوتای روده	Che *et al*., 2024
نانوذرات TiO_2+ دمای بالا	ماسل (*Mytilus coruscus*)	روده	افزایش مرگ و میر، افزایش خطر آلوده شدن به پاتوژن های بیماری‌زا (اثر ترکیبی دمای بالا و نانوذرات)	Li *et al*., 2024
نانوذرات اکسید روی (ZnO NPs)	*Takifugu obscurus*	آبشش، کلیه و روده	تغییر شکل لاروها، کاهش نرخ تولید مثل، بقا و استرس اکسیداتیو	Tang *et al*., 2024

al., 2019; Babaei *et al*., 2022). در تحقیق رضائیان و همکاران (۱۴۰۲)، مشخص شد که نمونه‌های ماهیان کپور معمولی (*Cyprinus carpio*) انگشت‌قد که به‌طور همزمان در مواجه با نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و اکسید روی قرار گرفتند، تغییراتی از جمله پرخونی، هایپرپلازی (Hyperplasia)، جوش‌خوردگی رشته‌های آبششی، خمیدگی رشته‌ی آبششی، برآمده شدن لایه اپیتلیال (Epithelial)، از هم‌گسیختگی لایه اپیتلیال، کوتاه‌شدگی رشته‌های آبششی ثانویه و ازدیاد سلول‌های اپیتلیال را نشان دادند. جدول ۷ اثرات مضر نانوساختارها را بر روی قسمت‌های مختلف بدن انواع آبزیان نشان می‌دهد.

چشم‌انداز آینده و زمینه‌های مورد تحقیق

استفاده از نانوفناوری در شیلات و آبزی‌پروری پتانسیل قابل توجه و مزایای مختلفی را ارائه می‌دهد. با این حال، در نظر گرفتن اثرات زیست‌محیطی بالقوه و اثرات طولانی‌مدت استفاده از نانوذرات در پرورش ماهی مهم است. تحقیقات بیش‌تری برای ارزیابی خطراتی مانند تجمع زیستی و سمیت در ماهی و اکوسیستم آبی اطراف آن مورد نیاز است. تحقیقات و همکاری مداوم بین دانشمندان و ذینفعان صنعت برای ایجاد دستورالعمل‌ها و استانداردهایی برای استفاده مسئولانه از نانوذرات بسیار مهم است. برنامه‌های آموزشی و آگاهی می‌تواند به پرورش‌دهندگان ماهی و متخصصان آبزی‌پروری در تصمیم‌گیری آگاهانه و اجرای استراتژی‌های مناسب برای کاهش اثرات نامطلوب بالقوه کمک کند. مطالعات آینده می‌تواند در رابطه با فرمولاسیون نانوذرات، سطوح دوز و روش‌های کاربرد برای اطمینان از ادغام ایمن و پایدار در شیوه‌های پرورش ماهی، بهینه و انجام شود. در

واقع با بررسی دقیق و تحقیقات مداوم، می‌توان از مزایای نانوفناوری در پرورش ماهی بهره برد و در عین حال هرگونه اثرات نامطلوب بالقوه را به حداقل رساند (Ahmed *et al*., 2024). از طرف دیگر عواملی چون هزینه‌های تولید مرتبط با سنتز، فرمولاسیون و کاربرد نانومواد ممکن است دسترسی آن‌ها را برای متخصصان آبزی‌پروری، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، مختل کند. بنابراین، تحقیقات آینده می‌تواند بر توسعه فرآیندهای تولید مقرون‌به‌صرفه، روش‌های تولید مقیاس‌پذیر و فرمول‌بندی‌های نانومواد مقرون‌به‌صرفه متناسب با نیازهای سیستم‌های مختلف آبزی‌پروری و ذینفعان متمرکز شود. برای رسیدگی به چالش‌ها و فرصت‌های پیچیده مرتبط با فناوری نانو در آبزی‌پروری، همکاری بین رشته‌ای و ادغام دانش ضروری است. محققان، دست‌اندرکاران، سیاستگذاران و ذینفعان صنعت در زمینه‌های مختلف از جمله فناوری نانو، آبزی‌پروری، علوم محیطی و بهداشت می‌توانند برای توسعه راه‌حل‌های جامع که ابعاد زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی را در نظر می‌گیرند، همکاری کنند. ابتکارات تحقیقاتی میان رشته‌ای می‌توانند تبادل دانش، نوآوری و انتقال فناوری را تسهیل کنند و منجر به ایجاد مشترک رویه‌ها و سیاست‌های آبزی‌پروری پایدار شوند. علاوه براین، سرمایه‌گذاری در تحقیق و آموزش برای پیشرفت حوزه نانوفناوری در مدیریت آبزی‌پروری و شیلات حیاتی است. آژانس‌های تأمین مالی تحقیقاتی، مؤسسات دانشگاهی و شرکای صنعتی باید حمایت از پروژه‌های تحقیقاتی چند رشته‌ای، برنامه‌های آموزشی و ابتکارات ظرفیت‌سازی متمرکز بر کاربردهای نانوفناوری در آبزی‌پروری را در اولویت قرار دهند. در نهایت با تقویت نوآوری، تضمین پایداری و اولویت دادن به نظارت بر محیط‌زیست، می‌توان از قدرت دگرگون‌کننده فناوری نانو برای سوق دادن آبزی‌پروری و شیلات به سوی آینده‌ای روشن‌تر و انعطاف‌پذیرتر استفاده کرد (Sreadah, 2023). هم‌چنین، تحقیقات و چشم‌اندازهای آینده می‌تواند در زمینه ترویج و توسعه‌ی نانوفناوری سبز (Green nanotechnology) و نانوسیستم‌های دوست‌دار محیط‌زیست در شیلات و آبزی‌پروری و فرآوری مواد غذایی به‌منظور به حداقل رساندن تخریب محیطی و خطرات احتمالی در نظر گرفته شود. در این راستا، دولت و سازمان‌های خصوصی تلاش می‌کنند تا برنامه‌های آگاهی‌سازی از مزایای محصولات نانوسبز و برندسازی محصولات و استراتژی‌های پیشگیری از خطر را از طریق طراحی فرآیندهای ایمن‌تر و سبز در جهت حمایت از تحقق اهداف توسعه پایدار ایجاد کنند (Aithal and Aithal, 2021).

نتیجه‌گیری

شیلات و آبزی‌پروری، نقش بسیار مهم و شناخته شده‌ای از لحاظ ایمنی و امنیت غذایی، توسعه‌ی محصولات طبیعی و متنوع با عملکردهای گوناگون و تضمین یک زندگی سالم داشته و به‌عنوان ابزاری کارآمد برای ایجاد اشتغال جوانان و حفظ وضعیت اقتصادی–معیشتی مردم در سطوح ملی و جهانی درنظر گرفته می‌شوند. در طی سالیان اخیر، با توجه به روند رو به رشد جمعیت جهان و آگاهی مردم از فواید مصرف غذاهای دریایی؛ آبزی‌پروری رواج بیش‌تری پیدا کرده و ماهی و محصولات شیلاتی در سبد غذایی خانواده‌ها نقش پررنگ‌تری به‌دلیل دارا بودن مواد مغذی ضروری، سالم و باارزش پیدا کرده‌اند. از طرف دیگر، در نظر گرفتن عواملی از جمله جذابیت، ظاهر زیبا، طعم و مزه‌ی خاص در تولید و توسعه‌ی محصولات غذایی– شیلاتی جدید، منجر به افزایش مصرف این گونه غذاهای بدیع در بین مصرف‌کنندگان؛ خصوصاً نوجوانان و جوانان شده است. اهمیت مصرف آبزیان و محصولات شیلاتی به‌دلیل وجود ترکیبات فعال زیستی استحصالی از آن‌ها از جمله پروتئین‌ها، اسیدهای آمینه ضروری، اسیدهای چرب مفید، کربوهیدرات‌ها، ویتامین‌ها، مواد معدنی و دیگر ترکیبات زیستی با ارزش می‌باشد که نقش بسیار مهمی در تغذیه و سلامت بشر با ایجاد و توسعه غذاهای عملکردی، محصولات غذایی–دارویی، زیست‌پزشکی و آرایشی و غیره ایفا می‌کنند. با همه این توضیحات، صنایع شیلات و آبزی‌پروری با چالش‌های متعددی از جمله آلودگی آب مزارع پرورشی، بیماری‌های متعدد، رشد کند آبزیان، کیفیت و استحکام پایین خوراک آبزیان، رسوب زیستی در حوضچه‌ها و استخرهای پرورش آبزیان، خوردگی و مقاومت کم قفس-های پرورش ماهیان و بسیاری از مشکلات دیگر مواجه شده‌اند. از سوی دیگر، محصولات شیلاتی به‌سبب وجود ترکیبات زیستی، بسیار فسادپذیر می‌باشند و روش‌های نگهداری سنتی و معمول قادر به حفظ کیفیت بالا و زمان

ماندگاری طولانی مدت محصول نیستند. از این‌رو بشر به یک ابزار کاربردی و مؤثر جهت پیشگیری، برطرف نمودن و مقابله با این چالش‌ها و مشکلات نیاز دارد. نانوفناوری می‌تواند به‌عنوان یک گزینه‌ای بسیار مناسب در این زمینه در نظر گرفته شود. علاوه براین، در دنیای مدرن امروز، تحقیق و توسعه از ارکان اصلی و اساسی پیشرفت فناوری‌های جدید در کشورهای مختلف جهان می‌باشند که نیازمند سرمایه‌گذاری در بخش اهداف تحقیقاتی و اجرایی هستند. به‌عبارتی، دستیابی به پیشرفت و توسعه در هر زمینه‌ای؛ نیازمند تحقیق، جست‌وجو و در نهایت به‌کارگیری نتایج حاصل از آن پژوهش و مطالعه در جهت حل مسائل، بهبود چالش‌ها و فعالیت‌های موجود است. با این توضیحات؛ فناوری نانو، یکی از دستاوردهای خاص و مهم بشر با ارائه نوآوری‌های جدید و رفع چالش‌های موجود در جامعه می‌باشد که دروازه جدیدی از پیشرفت و علم را برای اهداف بشر ایجاد کرده و به‌عنوان یک تکنولوژی منحصر به‌فرد با کابردهای بسیار متنوع، توجه بسیاری از محققان، پژوهشگران، تولیدکنندگان و صنعتگران را در سرتاسر جهان به‌خود جلب کرده است. به‌طوری که استفاده از نانوفناوری در آبزی‌پروری می‌تواند در تشخیص، کنترل و درمان بیماری‌های آبزیان، افزایش سلامت آبزیان، تحویل مؤثر دارو در بدن آبزیان، تولید واکسن‌های نانویی، بهبود رشد ماهی (افزایش بقا و مقاومت به بیماری)، فرمولاسیون خوراک، بهبود قوام و استحکام جیره‌های غذایی در آب، افزایش صید و برداشت ماهیان (از طریق ساخت طعمه‌های مخصوص مبتنی بر فناوری نانو)، مهندسی شیلات و آبزی‌پروری (از طریق افزایش استحکام و طول عمر تجهیزات ماهیگیری از جمله ساخت قایق‌ها، مخازن و قفس‌های پرورش ماهی مقاوم در برابر خوردگی امواج و املاح آب، و همچنین افزایش ماندگاری آب در استخرهای پرورش)، کنترل رسوب زیستی (رسوب زیستی ناشی از حمله باکتریایی، بی‌مهرگان و جلبک‌ها) و مدیریت حوضچه‌ها، تصفیه آب از فلزات سنگین و مدیریت محیط‌های آبی (حذف آلاینده‌ها، حذف آفت‌کش‌ها و سموم طبیعی، حذف مواد شیمیایی معدنی، آمونیاک، نیتریت و نیترات)، افزایش بازده تولیدمثلی، تسهیل تغییر جنسیت، توسعه انجماد اسپرم ماهیان، حفاظت از تنوع زیستی و بسیاری از موارد کاربردی دیگر، موثر واقع شده و در نهایت باعث ایجاد یک روند توسعه پایدار در آبزی‌پروری گردد. از طرف دیگر، در زمینه فرآوری محصولات شیلاتی؛ نانوساختارها از جمله نانولوله‌ها، نانوکامپوزیت‌ها، نانوامولسیون‌ها و نانولیپوزوم‌ها می‌توانند در زمینه‌های گوناگون از جمله ان‌کپسوله‌سازی، کنترل رهاسازی در مواد غذایی، بهبود فراهمی زیستی، پایداری، حفظ ارزش غذایی و افزایش زمان ماندگاری محصولات شیلاتی به‌کار گرفته می‌شوند. همچنین نانوسنسورهای زیستی، نانوبرچسب‌گذاری و نانوکدگذاری می‌توانند تازگی و کیفیت محصولات شیلاتی را تضمین کنند. آن‌ها در تشخیص مواد تقلبی، مواد سمی و آلرژنت‌ها، شناسایی و ردیابی محصولات و تجزیه و تحلیل خطر نقش‌های موثری را ایفا می‌کنند و در نهایت مدیریت زنجیره تأمین را افزایش می‌دهند. از این طریق، نانوفناوری در بازاریابی ماهی و محصولات شیلاتی اهمیت به‌سزایی دارد و می‌تواند یک بازار جذاب و رقابتی را برای تولیدکنندگان و فروشندگان از طریق تولید، ارزش‌گذاری و فروش محصولات ایمن و باکیفیت و جلب رضایت مشتری ایجاد کند. علاوه بر کاربرد بسیار وسیع نانوفناوری در علوم شیلات، اثرات استفاده‌ی غیراصولی و زیاد از نانوذرات و رهاسازی کنترل نشده آن در محیط می‌تواند عامل برهم‌زننده سلامت آبزیان و انسان باشد که در این زمینه باید مدیریت اصولی‌تری و اقدامات پیشگیرانه‌ای از طریق برنامه‌های آموزشی، آگاهی، اطلاع‌رسانی و هماهنگی بین دولت، مردم و سازمان‌های مربوطه صورت بگیرد. در نهایت پیشنهاد می‌شود که تولیدکنندگان، پروش‌دهندگان آبزیان و کارخانه‌های فرآوری محصولات شیلاتی با همکاری شرکت‌های دانش‌بنیان، محققان، متخصصان و جامعه‌ی دانشگاهی با تدوین برنامه-های مدیریتی و ایجاد یه روند افزایشی در همکاری‌های راهبردی، گام‌های مؤثر و هدفمندی را جهت استفاده‌ی اصولی و بهره‌برداری مفید از نانوفناوری و جلوگیری از رهاسازی کنترل نشده‌ی آن در محیط به‌منظور افزایش بازدهی کسب و کار خود و تولید محصولاتی با ارزش افزوده بالا، و توسعه پایدار صنعت شیلات و آبزی‌پروری بردارند.

منابع

آلبوغبیش ح.، خدا نظری آ. ۱۳۹۸. تاثیر پوشش نانوکیتوزان غنی شده با و بدون عصاره چای سبز (*Camellia sinensis L*) بر خواص فیزیکوشیمیایی، میکروبی و حسی ماهی گیش درخشان (*Carangoides coeruleopinnatus*) طی نگهداری در یخچال. *تحقیقات دامپزشکی و فرآورده‌های بیولوژیک*. ۳۲(۳): ۱۰۹-۹۷.

اجاق س.م.، کاظمی م.، میرصادقی ح. ۱۳۹۶. بررسی مقایسه‌ای اثر پوشش ژلاتین غنی شده با اسانس پونه کوهی خالص و نانولیپوزوم شده بر کیفیت میکروبی فیله ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان نگهداری شده در شرایط سرد (C2±4°). *مجله علوم و صنایع غذایی ایران*. ۱۴(۷۱): ۷۱-۵۹.

پوریوسف ن.، احمدی م.، شریعتی‌فر ن.، جعفریان س.، شهیدی س.ا. ۱۴۰۰. بررسی اثر اسانس پونه به فرم‌های نانو و آزاد بر نگهداری ماهی کپور نقره‌ای چرخ کرده در طول دوره نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد. *مجله سلامت و محیط زیست*. ۱۴(۴): ۵۷۶-۵۶۳.

حسینی س.و.، شاه‌حسینی غ.، جمالی ا.ح.، ضیائی ک. ۱۳۹۹. اثر نانوامولسیون بر پایه روغن آفتابگردان بر کیفیت و ماندگاری ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان طی دوره نگهداری در یخچال. *نشریه شیلات*. ۷۳(۳): ۴۹۶-۴۸۳.

حمزه‌ای م.، رویانی ل. ۱۴۰۲. اثر ضدمیکروبی و آنتی‌اکسیدانی نانوامولسیون اسانس گل‌پر بر خصوصیات کیفی و ماندگاری ناگت میگو. *علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران*. ۱۸(۲): ۱۱۰-۹۷.

ربیع‌پور ع.، باباخانی آ. ۱۴۰۲. خواص عملکردی و سلامتی‌بخش ترکیبات زیست‌فعال آبزیان. *علوم آبزی‌پروری*. ۱۱(۲): ۷۳-۴۷.

ربیع‌پور ع.، زکی‌پور رحیم‌آبادی ا. ۱۴۰۲. اهمیت کاربردی کلاژن استخراج شده از منابع دریایی، روش‌های استخراج و فعالیت زیستی پپتیدهای آن. علوم *آبزی‌پروری پیشرفته*. ۷(۷): ۴۱-۱۱.

رستم‌زاد ه.، خدیجه ت.، بقایی م. ۱۳۹۷. تولید و ارزیابی نانوکامپوزیت‌های زیست‌تخریب‌پذیر با خاصیت ضدمیکروبی. کنگره توسعه همکاری‌های علمی منطقه‌ای علوم صنایع غذایی و کشاورزی، مشهد. https://civilica.com/doc/797835

رستم‌زاد ه.، زکی‌پور ا.، ۱۳۹۹. تولید و ارزیابی فیلم زیست‌تخریب‌پذیر کیتوزان حاوی عصاره شیرین بیان (*Glycyrrhiza glabra*) به منظور بسته‌بندی فیله ماهی فیتوفاگ (*Hypophthalmichthys molitrix*). *نوآوری در علوم و فناوری غذایی*. ۱۲(۳): ۹۴-۷۹.

رستم‌زاد ه.، موسوی س.م. ۱۳۹۵. تغییرات شیمیایی، میکروبی و حسی فیله ماهی فیتوفاگ (*Hypophthalmichthys molitrix*) طی نگهداری در یخچال. *تغذیه آبزیان*، ۲(۱): ۷۲-۶۱.

رضائیان ح.، رضایی توابع ک.، میرواقفی ع. ۱۴۰۲. بررسی اثرات جداگانه و هم‌زمان نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) و نانو ذرات اکسید روی (ZnO) بر آسیب‌شناسی بافت آبشش ماهی کپور معمولی (*Cyprinus carpio*). *علوم آبزی‌پروری*. ۱۱(۲): ۱۳-۱.

سالاری س.، رضایی توابع ک.، میرواقفی ع.، حیدری ا. ۱۴۰۰. بررسی اثرات نانو اکسید مس مگنت شده (Fe3O4@CuO) در تصفیه فاضلاب آبزی‌پروری. *علوم آبزی‌پروری*. ۹(۲): ۸۸-۸۰.

غفوری ز.، فضل‌آرا ع.، پورمهدی م.، باورصاد ن. ۱۴۰۱. بررسی پایداری فیزیکی و شیمیایی نانوامولسیون امگا۳ و اثر ضدباکتریایی آن بر دو باکتری استافیلوکوکوس اورئوس و سودوموناس آئروجینوزا. *مجله علوم و صنایع غذایی ایران*. ۱۹(۱۲۸): ۱۳۱-۱۱۹.

قوطوری س.، اجاق س.م.، حسنی م.، عالیشاهی ع.، حسنی ش. ۱۴۰۲. اثر افزودن نانولیپوزوم‌های حامل روغن ماهی بر خواص تکنولوژیکی و کیفیت تغذیه‌ای همبرگر با چربی کاهش یافته طی نگهداری در یخچال (۴ درجه سانتی‌گراد). *بهره‌برداری و پروش آبزیان*. ۱۲(۱): ۱۶۲-۱۴۳.

لسانی س.، رستم‌زاد ه.، زکی‌پور ا.، سلیمی آ. ۱۳۹۹. تقویت خواص فیزیکی و مکانیکی فیلم زیست‌تخریب‌پذیر کاراژینان با استفاده از نانورس. *نشریه نوآوری در علوم و فناوری مواد غذایی*. ۱۲(۳): ۱۴۹-۱۳۷.

Abdel-Latif H.M., Dawood M.A., Mahmoud S.F., Shukry M., Noreldin A.E., Ghetas H.A., Khallaf, M.A. 2021. Copper oxide nanoparticles alter serum biochemical indices, induce histopathological alterations, and modulate transcription of cytokines, HSP70, and oxidative stress genes in Oreochromis niloticus. *Animals* 11(3), 652.

Adeyemi J.O., Elemike E.E., Onwudiwe D.C. 2019. ZnO nanoparticles mediated by aqueous extracts of dovyalis caffra fruits and the photocatalytic evaluations. *Materials Research Express* 6, e 125091.

Aghaei Z., Ghorani B., Emadzadeh B., Kadkhodaee R., Tucker N. 2020. Protein-based halochromic electrospun nanosensor for monitoring trout fish freshness. *Food Control* 111, 107065.

Ahmed M.T., Ali M.S., Ahamed T., Suraiya S., Haq M. 2024. Exploring the aspects of the application of nanotechnology system in aquaculture: a systematic review. *Aquaculture International* 1-30.

Ahuekwe E.F., Isibor P.O., Akinduti P.A., Salami A.O., Onuselogu C.C., Oshamika O.O., Oyesola O.L., Ichor T., Ezekiel O.M., Oziegbe O., Akinyosoye A.D. 2023. Application of nanochitosan in tagging and nano-barcoding of aquatic and animal meats. *Next Generation Nanochitosan* 483-498.

Aithal S., Aithal P.S. 2021. Green and eco-friendly Nanotechnology–concepts and industrial prospects. *International Journal of Management, Technology, and Social Sciences (IJMTS)* 6(1), 1-31.

Alak G., Atamanalp M., Parlak V., Uçar A. 2023. Recent insight into nanotechnology in fish processing: a knowledge gap analysis. *Nanotechnology* 34(38), 382001.

Alishahi A., Mirvaghefi A., Tehrani M., Farahmand H., Koshio S., Dorkoosh F., Elsabee M.Z. 2011. Chitosan nanoparticle to carry vitamin C through the gastrointestinal tract and induce the non-specific immunity system of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Carbohydrate Polymers* 86, 142-146.

Ameur A., Bensid A., Ozogul F., Ucar Y., Durmus M., Kulawik P., Boudjenah-Haroun S. 2022. Application of oil-in-water nanoemulsions based on grape and cinnamon essential oils for shelf-life extension of chilled flathead mullet fillets. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 102(1), 105-112.

Arfat Y.A., Ahmed J., Hiremath N., Auras R., Joseph A. 2017. Thermo-mechanical, rheological, structural and antimicrobial properties of bionanocomposite films based on fish skin gelatin and silver-copper nanoparticles. *Food Hydrocolloids* 62, 191-202.

Aquino A., Conte-Junior C.A. 2020. A systematic review of food allergy: Nanobiosensor and food allergen detection. *Biosensors* 10(12), 194.

Ashraf P.M., Edwin L. 2016. Nano copper oxide incorporated polyethylene glycol hydrogel: an efficient antifouling coating for cage fishing net. *International Biodeterioration & Biodegradation* 115, 39-48.

Ashraf P.M., Sasikala K.G., Thomas S.N., Edwin L. 2020. Biofouling resistant polyethylene cage aquaculture nettings: A new approach using polyaniline and nano copper oxide. *Arabian Journal of Chemistry* 13(1), 875-882.

Askari Hesni M., Hedayati S.A., Qadermarzi A., Pouladi M., Zangi Abadi Z., Naghshbandi N. 2020. Application of iron oxide nanoparticles in the reactor for treatment of effluent from fish farms. *Iranian Journal of Fisheries Sciences* 19(3), 1319-1328.

Athif P., Murali M., Suganthi P., Sadiq Bukhari A., Syed Mohamed H.E., Basu H., Singhal R.K. 2020. Alterations in renal markers of tilapia fish exposed to silicon dioxide nanoparticle. *Uttar Pradesh Journal of Zoology* 41, 48-55.

Awad E., El-Fiqi A., Austin D., Lyndon A. 2020. Possible effect of lesser galangal (*Alpinia officinarum*) extracts encapsulated into mesoporous silica nanoparticles on the immune status of rainbow trout (Oncorhynchus n). *Aquaculture Research* 51, 3674-3684.

Azari A., Anvar S.A.A., Ahari H., Sharifan A., Motallebi Moghanjoghi A.A. 2020. Study on Nanosilver-TiO2 photocatalytic nanocomposite coating with extrusion technique for increasing shelf life of Nile Tilapia (Oreochromis niloticus). *Iranian Journal of Fisheries Sciences* 19(5), 2618-2633.

Babaei M., Tayemeh M.B., Jo M.S., Yu I.J., Johari S.A. 2022. Trophic transfer and toxicity of silver nanoparticles along a phytoplankton-zooplankton-fish food chain. *Science of The Total Environment* 842, 156807.

Bagherzadeh Lakani F. 2023. Application of nanotechnology in diagnosis, prevention, and treatment of the fish diseases. *International Journal of Veterinary Research* 3(1), 29-37.

Bahramian G., Golestan L., Khosravi-Darani K. 2018. Antimicrobial and antioxidant effect of nanoliposomes containing Zataria multiflora Boiss essential oil on the rainbow trout fillets during refrigeration. *Biointerface Research in Applied Chemistry* 8(5), 3505-3513.

Baldissera M.D., Souza C.F., Zeppenfeld C.C., Velho M.C., Klein B., Abbad L.B., Ourique A.F., Wagner R., Da Silva A.S., Baldisserotto B. 2020. Dietary supplementation with nerolidol nanospheres improves growth, antioxidant status and fillet fatty acid profiles in Nile tilapia: benefits of nanotechnology for fish health and meat quality. *Aquaculture* 516, e 734635.

Baskaran V. 2023. Nanotechnologies in Aquatic Disease Diagnosis and Drug Delivery. In Nanotechnological Approaches to the Advancement of Innovations in Aquaculture (pp. 1-21). *Cham: Springer International Publishing.*

Bhat I.A. 2023. Nanotechnology in reproduction, breeding and conservation of fish biodiversity: Current status and future potential. *Reviews in Aquaculture* 15(2), 557-567.

Bhattacharjee M.R. 2023. The Intricates of Patent in Nanotechnology. *Journal of Survey in Fisheries Sciences* 10(3S), 6698-6703.

BT N.K., Thakur N., Sharma C., Shanthanagouda A.H., Taygi A., Singh A. 2022. Effect of dietary chitosan nanoparticles on immune response and disease resistance against Aeromonas hydrophila infection in tropical herbivore fish (rohu, Labeo rohita). *Aquaculture International* 30(5), 2439-2452.

Bundschuh M., Filser J., Lüderwald S., McKee M.S., Metreveli G., Schaumann G.E., Schulz R., Wagner S. 2018. Nanoparticles in the environment: where do we come from, where do we go to?. *Environmental Sciences Europe* 30(1), 1-17.

Cetinkaya T., Wijaya W. 2024. Advanced nanomaterials for enhancing the shelf life and quality of seafood products. *Food Bioscience* p.104018.

Chae H.G., Kumar S. 2006. Rigid-rod polymeric fibers. *Journal* of *Applied Polymer Science* 100, 791-802.

Chalmpes N., Kouloumpis A., Zygouri P., Karouta N., Spyrou K., Stathi P., Tsoufis T., Georgakilas V., Gournis D., Rudolf P. 2019. Layer-by-layer assembly of clay–carbon nanotube hybrid superstructures. *ACS omega* 4(19), 18100-18107.

Chandra P. 2016. Nanobiosensors for personalized and onsite biomedical diagnosis. The Institution of Engineering and Technology.

Chang C.C., Hsu I.K., Aykol M., Hung W.H., Chen C.C., Cronin S.B. 2010. A new lower limit for the ultimate breaking strain of carbon nanotubes. *ACS Nano* 4, 5095-5100.

Chang P.R., Jian R., Yu J., Ma X. 2010. Fabrication and characterisation of chitosan nanoparticles/plasticised-starch composites. *Food Chemistry* 120(3), 736-40.

Chaparro-Hernandez S., Ruiz-Cruz S., Marquez-Rios E., Ocano-Higuera V.M., Valenzuela-Lopez C.C., ORNELAS-PAZ J.D.J., Del-Toro-Sanchez C.L. 2015. Effect of chitosan-carvacrol edible coatings on the quality and shelf life of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets stored in ice. *Food Science and Technology* 35, 734-741.

Che S., Huang M., Ma H., Wan Z., Feng J., Ding S., Li X. 2024. Toxic effects of nanopolystyrene and cadmium on the intestinal tract of the Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*). *Ecotoxicology and Environmental Safety* 270, p.115936.

Chen S., Qi G., Zhang L., Duan X., Bai M., Hu M., Li P., Zhao W., Sun X., Guo Y., Chen W. 2023. Detection of salmon meat freshness using QCM gas sensor array combined with physicochemical method. *Microchemical Journal* 194, 109353.

Cheng T.C., Chang C.Y., Chang C.I., Hwang C.J., Hsu H.C., Wang D.Y., Yao K.S. 2008. Photocatalytic bactericidal effect of TiO2 film on fish pathogens. *Surface and Coatings Technology* 203(5-7), 925-927.

Chelliah R., Wei S., Daliri E.B.M., Rubab M., Elahi F., Yeon S.J., Jo K.H., Yan P., Liu S., Oh D.H., 2021. Development of nanosensors based intelligent packaging systems: food quality and medicine. *Nanomaterials* 11(6), 1515.

Chen H., Yada R. 2011. Nanotechnologies in agriculture: new tools for sustainable development. *Trends Food Science Technol* 22(11), 585-94.

Chirwatkar B., Chhaba B. 2018. Nanotechnology-A Novel Approach to Process Fish and Fishery Products.

Çorapci B. 2022. The effect of rosehip seed oil nanoemulsion on some physical, chemical, and microbiological properties of sea bass fillets stored at 4±1 C. *Journal of Aquatic Food Product Technology* 31(7), 672-685.

Costa A.D.S., BRANDAO H.D.M., Da Silva S.R., Bentes-Sousa A.R., Diniz Junior J.A.P., Pinheiro, J., Ribeiro-Costa R.M. 2015. Mucoadhesive nanoparticles: a new perspective for fish drug application. Embrapa Gado de Leite-Nota Técnica/Nota Científica (ALICE).

Cui H., Yang M., Shi C., Li C., Lin L. 2022. Application of xanthan-gum-based edible coating incorporated with Litsea cubeba essential oil nanoliposomes in salmon preservation. *Foods* 11(11),

1535.

Daniel S.C.G.K., Sironmani T.A., Dinakaran S. 2016. Nano formulations as curative and protective agent for fish diseases: Studies on red spot and white spot diseases of ornamental gold fish Carassius auratus. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies* 4(4), 255-261.

Dawit Moges F., Hamdi H., Al-Barty A., Zaid A.A., Sundaray M., Parashar S.K.S., Gubale A.G., Das B. 2022. Effects of selenium nanoparticle on the growth performance and nutritional quality in Nile Tilapia, Oreochromis niloticus. *PloS one* 17(6), e0268348.

Delavari N.M., Gharaei A., Mirdar H.J., Davari A., Rastiannasab A. 2022. Modulatory effect of dietary copper nanoparticles and vitamin C supplementations on growth performance, hematological and immune parameters, oxidative status, histology, and disease resistance against Yersinia ruckeri in rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). *Fish Physiology and Biochemistry* 1-19.

Devkota H.R., Jha D.K., Joshi T.P., Shrestha S. 2024. Applications of nanobubble aeration technology for aquaculture practices: A review. *Nepalese Journal of Agricultural Sciences* 26, p.223.

Duan X., Zhang M., Li X., Mujumdar A.S. 2008. Microwave freeze drying of sea cucumber coated with nanoscale silver. *Drying Technology* 26(4), 413-19.

Dube E., Okuthe G.E. 2023. Engineered nanoparticles in aquatic systems: Toxicity and mechanism of toxicity in fish. *Emerging Contaminants* p.100212.

Ebadi Z., Khodanazary A., Hosseini S.M., Zanguee N. 2019. The shelf life extension of refrigerated Nemipterus japonicus fillets by chitosan coating incorporated with propolis extract. *International Journal of Biological Macromolecules* 139, 94-102.

Fajardo C., Martinez-Rodriguez G., Blasco J., Mancera J.M., Thomas B., De Donato M. 2022. Nanotechnology in aquaculture: Applications, perspectives and regulatory challenges. *Aquaculture and Fisheries* 7(2), 185-200.

FAO. 2018. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome.

FAO. 2018. The state of world fisheries and aquaculture 2018 - meeting the sustainable development goals Food & Agriculture Organization, Rome.

Fayaz M., Rabani M.S., Wani S.A., Thoker S.A. 2021. Nano-agriculture: A novel approach in agriculture. *In Microbiota and Biofertilizers; Springer: Cham, Switzerland* pp. 99-122.

Fukasaku K., Takeda K., Shiraishi K. 1998. First-principles study on electronic structures of protein nanotubes. *Journal of the physical society of japan* 67(11), 3751-3760.

Galstyan V., Ponzoni A., Kholmanov I., Natile M.M., Comini E., Sberveglieri G. 2020. Highly sensitive and selective detection of dimethylamine through Nb-doping of TiO2 nanotubes for potential use in seafood quality control. *Sensors and Actuators B: Chemical* 303, 127217.

Gao X., Ma C., Wang H., Zhang C., Huang Y. 2023. Multi-walled carbon nanotube induced liver injuries possibly by promoting endoplasmic reticulum stress in Cyprinus carpio. *Chemosphere* 325, p.138383.

Ghafarifarsani H., Hedayati S.A., Yousefi M., Hoseinifar S.H., Yarahmadi P., Mahmoudi S.S., Van Doan H. 2022. Toxic and bioaccumulative effects of zinc nanoparticle exposure to goldfish, *Carassius auratus* (Linnaeus, 1758). *Drug and Chemical Toxicology* pp.1-11.

Gharibzahedi S.M.T., Mohammadnabi S. 2017. Effect of novel bioactive edible coatings based on jujube gum and nettle oil-loaded nanoemulsions on the shelf-life of Beluga sturgeon fillets. *International Journal of Biological Macromolecules* 95, 769-777.

Gholipourkanani H., Buller N., Lymbery A. 2019. In vitro antibacterial activity of four nano-encapsulated herbal essential oils against three bacterial fish pathogens. *Aquaculture Research* 50(3), 871-875.

Giri S.S., Park S.C. 2022. Application of carbon nanotubes in the advancement of fish vaccine. *In Biotechnological advances in aquaculture health management* (pp. 61-78). Singapore: Springer Nature Singapore.

Graveland-Bikker J.F., Ipsen R., Otte J., de Kruif C.G. 2004. Influence of calcium on the self-assembly of partially hydrolyzed α-lactalbumin. *Langmuir* 20(16), 6841-6846.

Guan R., Luo X., Lyu F., Tao M., Liu M., Wang Y. 2016. Preparation and evaluation of epigallocatechin-3-gallate nanoliposomes in cod fish (*Gadus macrocephalus*) preservation and anticancer studies in NCI-N87 gastric carcinoma cells. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine* 12(2), 541-542.

Gulati S., Kumar S., Sood A.K., Sharma V. 2022. Nanosensors: Consumer Nanoproducts for the Detection of Adulterants and Toxicants in Food. *In Handbook of Consumer Nanoproducts* (pp. 773-795). Singapore: Springer Nature Singapore.

Haghdoost A., Golestan L., Hasani M., Noghabi M.S., Shahidi S.A. 2022. Assessment of the potential of algae phycobiliprotein nanoliposome for extending the shelf life of common carp burgers during refrigerated storage. *Fisheries and Aquatic Sciences* 25(5), 276-286.

Haghighat F., Kim Y., Sourinejad I., Yu I.J., Johari S.A. 2021. Titanium dioxide nanoparticles affect the toxicity of silver nanoparticles in common carp (Cyprinus carpio). *Chemosphere* 262, 127805.

Hajji S., Hamdi M., Boufi S., Li S., Nasri M. 2019. Suitability of chitosan nanoparticles as cryoprotectant on shelf life of restructured fish surimi during chilled storage. *Cellulose* 26, 6825-6847.

Handy R.D. 2012. FSBI briefing paper: Nanotechnology in fisheries and aquaculture. Fisheries Society of the British Isles, UK, pp. 1–29. www.fsbi.org.uk/assets/brief-nanotechnology-fisheriesaquaculture.pdf.

Hasani S., Shahidi M., Ojagh S.M. 2019. The Production and Evaluation of Nanoliposomes Containing Bioactive Peptides Derived from Fish Wastes Using the Alkalase Enzyme. *Research and Innovation in Food Science and Technology* 8(1), 31-44.

Hashemi M., Adibi S., Hojjati M., Razavi R., Noori S.M.A. 2023. Impact of alginate coating combined with free and nanoencapsulated Carum copticum essential oil on rainbow trout burgers. *Food Science & Nutrition* 11(3), 1521-1530.

Hesni M.A., Hedayati A., Qadermarzi A., Pouladi M., Zangiabadi S., Naqshbandi N. 2020. Using Chlorella vulgaris and iron oxide nanoparticles in a designed bioreactor for aquaculture effluents purification. *Aquacultural Engineering* 90, 102069.

Huang S., Wang L., Liu L., Hou Y., Li L. 2015. Nanotechnology in agriculture, livestock, and aquaculture in China. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 369-400.

Huang Y., Mei L., Chen X., Wang Q. 2018. Recent developments in food packaging based on nanomaterials. *Nanomaterials* 8(10), 830p.

Husen A. 2017. Gold nanoparticles from plant system: Synthesis, characterization and their application. *In nanoscience and plant–soil systems* pp. 455-479.

Ighalo J.O., Sagboye P.A., Umenweke G., Ajala O.J., Omoarukhe F.O., Adeyanju C.A., Ogunniyi S., Adeniyi A.G. 2021. CuO nanoparticles (CuO NPs) for water treatment: A review of recent advances. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* 15, 100443.

Iwuozor K.O., Ighalo J.O., Ogunfowora L.A., Adeniyi A.G., Igwegbe C.A. 2021. An empirical literature analysis of adsorbent performance for methylene blue uptake from aqueous media. *Journal of environmental chemical engineering* 9(4), 105658.

Jafar G., Sutrisno E. 2024. REVIEW ARTICLE LIPID-BASED NANOTECHNOLOGY. *Medical Sains: Jurnal Ilmiah Kefarmasian* 9(1), 189-204.

Jain K.K. 2003. Nanodiagnostics: application of nanotechnology in molecular diagnostics. *Expert review of molecular diagnostics* 3(2), 153-161.

Javadifard M., Khodanazary A., Hosseini S.M. 2023. The effects of chitosan-nanoclay nanocomposite coatings incorporated with gallic acid on the shelf life of rainbow trout during storage in the refrigerator. *Journal of Food Measurement and Characterization* 17(2), 1794-1805.

Jeong S.H., Hwang Y.H., Yi S.C. 2005. Antibacterial properties of padded PP/PE nonwovens incorporating nano-sized silver colloids. *Journal of Materials Science* 40, 5413-5418.

Jitpasutham S., Sinsomsak W., Chuesiang P., Ryu V., Siripatrawan U. 2024. Green active coating from chitosan incorporated with spontaneous cinnamon oil nanoemulsion: Effects on dried shrimp quality. *International Journal of Biological Macromolecules* p.129711.

Kamali Sabeti A., Hodhodi A., Rostamzad H. 2023. Application of nanotechnology in the food industry- A review. Conference: 3rd International Conference on Researches in Nanotechnology & Nanoscience, University of Tehran, Iran, Tehran. April 2023

Kaul S., Gulati N., Verma D., Mukherjee S., Nagaich U. 2018. Role of nanotechnology in cosmeceuticals: a review of recent advances. *Journal of Pharmaceutics* e, 3420204.

Khan M.Z.H., Hossain M.M.M., Khan M., Ali M.S., Aktar S., Moniruzzaman M., Khan M. 2020. Influence of nanoparticle-based nano-nutrients on the growth performance and physiological parameters in tilapia (*Oreochromis niloticus*). *RSC Advances* 10(50), 29918-29922.

Khorasani S., Danaei M., Mozafari M.R. 2018. Nanoliposome technology for the food and nutraceutical industries. *Trends in Food Science & Technology* 79, 106-115.

Korni F., Khalil F. 2017. Effect of ginger and its nanoparticles on growth performance, cognition capability, immunity and prevention of motile Aeromonas septicaemia in Cyprinus carpio fingerlings. *Aquaculture Nutrition* 23(6), 1-8.

Lammel T., Thit A., Mouneyrac C., Baun A., Sturve J., Selck H. 2019. Trophic transfer of CuO NPs and dissolved Cu from sediment to worms to fish–a proof-of-concept study. *Environmental Science: Nano* 6(4), 1140-1155.

Lee S.J., Rahman A.M. 2014. Intelligent packaging for food products. In Innovations in food packaging (pp. 171-209). Academic Press.

Lee Y.L., Shih Y.S., Chen Z.Y., Cheng F.Y., Lu J.Y., Wu Y.H., Wang Y.J. 2022. Toxic effects and mechanisms of silver and zinc oxide nanoparticles on zebrafish embryos in aquatic ecosystems. *Nanomaterials* 12(4), p.717.

Li Q., Gong Y., Du T., Zhang L., Ma Y., Zhang T., Wu Z., Zhang W., Wang J. 2024. Modified halloysite nanotubes as GRAS nanocarrier for intelligent monitoring and food preservation. *Food Chemistry* p.138678.

Li Z., Sokolova I., Shang Y., Huang W., Khor W., Fang J.K., Wang Y., Hu M. 2024. Effects of elevated temperature and different crystal structures of TiO2 nanoparticles on the gut microbiota of mussel Mytilus coruscus. *Marine pollution bulletin* 199, 115979.

Littman J. 2022. Chipotle tests RFID technology to improve food traceability.

Liu Y., Hu J., Sun J.S., Li Y., Xue S.X., Chen X.Q., Li X.S., Du G.X. 2014. Facile synthesis of multifunctional multi-walled carbon nanotube for pathogen Vibrio alginolyticus detection in fishery and environmental samples. *Talanta* 128, 311-318.

Luo Z., Qin Y., Ye Q. 2015. Effect of nano-TiO2-LDPE packaging on microbiological and physicochemical quality of Pacific white shrimp during chilled storage. *International Journal of Food Science & Technology* 50(7), 1567-1573.

Malik S., Muhammad K., Waheed Y. 2023. Nanotechnology: A revolution in modern industry. *Molecules* 28(2), 661.

Manikandan V., Min S.C. 2023. Roles of polysaccharides-based nanomaterials in food preservation and extension of shelf-life of food products: A review. *International Journal of Biological Macromolecules* p.126381.

Mansouri-Tehrani H.A., Keyhanfar M., Behbahani M., Dini G. 2021. Synthesis and characterization of algae-coated selenium nanoparticles as a novel antibacterial agent against Vibrio harveyi, a Penaeus vannamei pathogen. *Aquaculture* 534, 736260.

Melo L.F., Bott T.R. 1997. Biofouling in water systems. *Experimental thermal and fluid science* 14(4), 375-381.

Meral R., Ceylan Z. Kose S. 2019. Limitation of microbial spoilage of rainbow trout fillets using characterized thyme oil antibacterial nanoemulsions. *Journal of Food Safety* 39(4), e12644.

Mizieli-nska M., Kowalska U., Jarosz M., Sumi-nska P. 2018. A comparison of the effects of packaging containing nano ZnO or polylysine on the microbial purity and texture of cod (*Gadus morhua*) fillets. *Nanomaterials* 8(3), 158.

Mousavipour N., Babaei S., Moghimipour E., Moosavi-Nasab M., Ceylan Z. 2021. A novel perspective with characterized nanoliposomes: Limitation of lipid oxidation in fish oil. *LWT* 152, p.112387.

Muruganandam M., Chipps S.R., Ojasvi P.R. 2019. On the advanced technologies to enhance fisheries production and management. *Acta Scientific Agriculture* 3(8), 216-222.

Murata J.I., Ohya Y., Ouchi T. 1997. Design of quaternary chitosan conjugate having antennary galactose residues as a gene delivery tool. *Carbohydrate polymers* 32(2), 105-109.

Naguib M., Mahmoud U.M., Mekkawy I.A., Sayed A.E.D.H. 2020. Hepatotoxic effects of silver nanoparticles on Clarias gariepinus; Biochemical, histopathological, and histochemical studies. *Toxicology Reports* 7, 133-141.

Naebe M., Lin T., Wang X. 2010. Carbon nanotubes reinforced electrospun polymer nanofibres. *Nanofibers* 11, p.8160.

Nasr-Eldahan S., Nabil-Adam A., Shreadah M.A., Maher A.M., El-Sayed Ali T. 2021. A review article on nanotechnology in aquaculture sustainability as a novel tool in fish disease

control. *Aquaculture International* 29, 1459-1480.

Nirmalkar R., Suresh E., Felix N., Kathirvelpandian A., Nazir M.I., Ranjan A. 2022. Synthesis of iron nanoparticles using Sargassum wightii extract and its impact on serum biochemical profile and growth response of Etroplus suratensis juveniles. *Biological Trace Element Research* 201(3), 1451-1458.

Noman M.T., Ashraf M.A., Ali A. 2019. Synthesis and applications of nano-TiO2: A review. *Environmental Science and Pollution Research* 26(4), 3262-3291.

Noori Hashemabad Z.N., Shabanpour B., Azizi H., Ojagh S.M., Alireza A. 2018. Effects of Tio 2 Nanocomposite Packaging and Gamma Irradiation on the Shelf-life of Rainbow trout Stored at (+ 4◦ C). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 18(12), 1387-1397.

Okamoto H., Takeda K., Shiraishi K. 2001. First-principles study of the electronic and molecular structure of protein nanotubes. *Physical Review B* 64(11), p.e 115425.

Omanović-Mikličanina E., Maksimović M. 2016. Nanosensors applications in agriculture and food industry. *Bull Chem Technol Bosnia Herzegovina* 47, 59-70.

Otoni C.G., Avena-Bustillos R.J., Olsen C.W., Bilbao-Sainz C., McHugh T.H. 2016. Mechanical and water barrier properties of isolated soy protein composite edible films as affected by carvacrol and cinnamaldehyde micro and nanoemulsions. *Food Hydrocolloids* 57, 72-79.

Ozogul Y., Yuvka İ., Ucar Y., Durmus M., Kösker A.R., Öz M., Ozogul F. 2017. Evaluation of effects of nanoemulsion based on herb essential oils (rosemary, laurel, thyme and sage) on sensory, chemical and microbiological quality of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets during ice storage. *Lwt* 75, 677-684.

Patila M., Chalmpes N., Dounousi E., Stamatis H., Gournis, D. 2020. Use of functionalized carbon nanotubes for the development of robust nanobiocatalysts. *In Methods in Enzymology* 630, 263-301.

Paulpandian P., Beevi I.S., Somanath B., Kamatchi R.K., Paulraj B., Faggio C. 2023. Impact of Camellia sinensis iron oxide nanoparticle on growth, hemato-biochemical and antioxidant capacity of blue gourami (*Trichogaster trichopterus*) fingerlings. *Biological Trace Element Research* 201(1), 412-424.

Pourmoghadam M., Ahari H., Anvar S.A., Allahyaribeik S., Ataee M. 2023. Effect of saffron nanoemulsion on the shelf life extension of shrimp, Penaeus semisulcatus using an ultrasonic homogenizer. *Iranian Journal of Fisheries Sciences* 22(4), 828-852.

Pundir M., Prasher P., Vasić K., Leitgeb M., Kumar A., Prakash R., Knez Z., Pandey J.K., Kumar S. 2021. Enzyme modified CNTs for biosensing application: Opportunities and challenges. *Colloid and Interface Science Communications* 44, 100506.

Qiu L., Zhang M., Bhandari B., Yang C. 2022. Shelf life extension of aquatic products by applying nanotechnology: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 62(6), 1521-1535.

Quercia G., Brouwers H.J.H. 2010. June. Application of nano-silica (nS) in concrete mixtures. In 8th fib PhD symposium in Kgs, Lyngby, Denmark (pp. 431-436).

Rabiepour A., Hodhodi A. 2023. Modified atmosphere packaging as a preservation method to increase the shelf life of seafood products. 14th International Conference on Food Industry Sciences, Organic Farming and Food Security, Poland. https://civilica.com/doc/1705798

Rabiepour A., Hodhodi A., Babakhani A. 2023. A review of the nutritional and functional importance of sea cucumber as a beneficial marine resource of bioactive compounds, The 12th International Conference on Agriculture, Environment, Urban and Rural Development,https://civilica.com/doc/1692351

Rabiepour A, Hodhodi A, Mahdiany Bora Kh. 2022. Usage of biodegradable packaging derived from fishery resources considering environmental approaches. 12th International Conference on Food Industry Sciences, Organic Farming and Food Security, At: Poland.

Rajesh Kumar S., Ishaq Ahmed V.P., Parameswaran V., Sudhakaran R., Sarath Babu V., Sahul Hameed A.S. 2008. Potential use of chitosan nanoparticles for oral delivery of DNA vaccine in Asian sea bass (Lates calcarifer) to protect from Vibrio (Listonella) anguillarum. *Fish Shellfish and Immunology* 25(1-2), 47-56.

Rather M.A., Sharma R., Aklakur M., Ahmad S., Kumar N., Khan M., Ramya V.L. 2011. Nanotechnology: a novel tool for aquaculture and fisheries development. A prospective mini-review. *Fisheries and Aquaculture Journal* 16(1-5), 3.

Rather M.A., Sharma R., Aklakur Md, Akhtar M.S., Alexander C., Ahmad S., Khan M. 2011.

Nanotechnology: An emerging avenue for aquaculture and fisheries. *World Aquaculture* 42(3), 9-11.

Rather M.A., Sharma R., Gupta S., Ferosekhan S., Ramya V.L., Jadhao S.B. 2013. Chitosan-nanoconjugated hormone nanoparticles for sustained surge of gonadotropins and enhanced reproductive output in female fish. *PLoS ONE* 8, p. e57094.

Raza M.A., Kanwal Z., Shahid A., Fatima S., Sajjad A., Riaz S., Naseem S. 2021. Toxicity Evaluation of Arsenic Nanoparticles on Growth, Biochemical, Hematological, and Physiological Parameters of Labeo rohita Juveniles. *Advances in Materials Science and Engineering* pp. 1-10.

Reza Mozafari M., Johnson C., Hatziantoniou S., Demetzos C. 2008. Nanoliposomes and their applications in food nanotechnology. *Journal of Liposome Research* 18(4), 309-327.

Rhim J.W., Wang L.F., Hong, S.I. 2013. Preparation and characterization of agar/silver nanoparticles composite films with antimicrobial

Rostamzad H. 2020. Biodegradable Films for Food Packaging. In *Food Packaging* (pp. 83-102). CRC Press.

Rostamzad H., Paighambari S.Y., Shabanpour B., Ojagh S.M., Mousavi S.M. 2016. Improvement of fish protein film with nanoclay and transglutaminase for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life* 7, 1-7.

Rostamzad H., Abbasi Mesrdashti R., Akbari Nargesi E., Fakouri Z. 2019. Shelf life of refrigerated silver carp, Hypophthalmichthys molitrix, fillets treated with chitosan film and coating incorporated with ginger extract. *Caspian Journal of Environmental Sciences* 17(2), 143-153.

Rouhani M. 2019. Fluoro-functionalized graphene as a promising nanosensor in detection of fish spoilage: a theoretical study. *Chemical Physics Letters* 719, 91-102.

Saleh M., Soliman, H., El-Matbouli M. 2015. Gold nanoparticles as a potential tool for diagnosis of fish diseases. In Veterinary infection biology: Molecular diagnostics and high-throughput strategies (pp. 245-252). Humana Press, New York, NY.

Sarkar B., Mahanty A., Gupta S.K., Choudhury A.R., Daware A., Bhattacharjee S. 2022. Nanotechnology: A next-generation tool for sustainable aquaculture. *Aquaculture* 546, e 737330.

Sayyari Z., Rabani M., Farahmandfar R., Esmaeilzadeh Kenari R., Mousavi Nadoshan, R. 2021. The effect of nanocomposite edible coating enriched with Foeniculum vulgare essential oil on the shelf life of Oncorhynchus mykiss fish fillets during the storage. *Journal of Aquatic Food Product Technology* 30(5), 579-595.

Sekhon B.S. 2014. Nanotechnology in agri-food production: an overview. *Nanotechnology, science and applications* 7, 31-53.

Shah B.R., Mraz J. 2020. Advances in nanotechnology for sustainable aquaculture and fisheries. *Reviews in Aquaculture* 12(2), 925-942.

Shankar S., Danneels F., Lacroix M. 2019. Coating with alginate containing a mixture of essential oils and citrus extract in combination with ozonation or gamma irradiation increased the shelf life of Merluccius sp. fillets. *Food Packaging and Shelf Life* 22, 100434.

Sharifimehr S., Soltanizadeh N., Goli S.A.H. 2019. Physicochemical properties of fried shrimp coated with bio-nanocoating containing eugenol and Aloe vera. *LWT-Food Science and Technology* 109, 33-39.

Shine F., Thomas A.A., Shibu J.S.T., Dhanya R. 2018. Response of the antioxidant system in Ore-ochromis mossambicus reared on gold nanoparti-cle fortified diet. *International Journal of Science and Resources Publication* 8(9), 2250-3153

Shirvanimoghaddam K., Czech B., Abolhasani M.M., Naebe M. 2018. Sustainable periodically patterned carbon nanotube for environmental application: Introducing the cheetah skin structure. *Journal of Cleaner Production* 179, 429-440.

Shirvanimoghaddam K., Czech B., Wiącek A.E., Ćwikła-Bundyra W., Naebe M. 2019. Sustainable carbon microtube derived from cotton waste for environmental applications. *Chemical Engineering Journal* 361, 1605-1616.

Siddiqi K.S., Husen A., Rao R. 2018. A review on biosynthesis of silver nanoparticles and their biocidal properties. *Journal of Nanobiotechnology* 16, 14.

Sidhu A.K., Verma N., Kaushal P. 2022. Role of biogenic capping agents in the synthesis of metallic nanoparticles and evaluation of their therapeutic potential. *Frontiers in Nanotechnology* 3, 801620.

Soltani L., Ghaneialvar H., Mahdavi, A.H. 2023. An overview of the role of metallic and nonmetallic

nanoparticles and their salts during sperm cryopreservation and in vitro embryo manipulation. Nucleosides, Nucleotides & Nucleic Acids, 42(3): 262-279.

Souza C.F., Baldissera M.D., Santos R.C., Raffin R.P., Baldisserotto B. 2017. Nanotechnology improves the therapeutic efficacy of Melaleuca alternifolia essential oil in experimentally infected Rhamdia quelen with Pseudomonas aeruginosa. *Aquaculture* 473, 169-171.

Sreadah M.A. 2023. Emerging Trends in Nanotechnology for Sustainable Aquaculture and Fishery Management. *Journal of Fisheries Science* 5(2).

Sukkarun P., Kitiyodom S., Kamble M.T., Bunnoy A., Boonanuntanasarn S., Yata T., Boonrungsiman S., Thompson K.D., Rodkhum C., Pirarat, N. 2024. Systemic and mucosal immune responses in red tilapia (Oreochromis sp.) following immersion vaccination with a chitosan polymer-based nanovaccine against Aeromonas veronii. *Fish & Shellfish Immunology* 146, 109383.

Susitharan V., Sindhu C. 2021. Nanotechnological approaches in aquaculture. *Vigyan Varta* 2(9), 31-36.

Tang Z.P., Chen C.W., Xie J. 2018. Development of antimicrobial active films based on poly (vinyl alcohol) containing nano-TiO2 and its application in macrobrachium rosenbergii packaging. *Journal of Food Processing and Preservation* 42(8), e13702.

Tang S., Wang J., Zhu X., Shen D. 2024. Ecological Risks of Zinc Oxide Nanoparticles for Early Life Stages of Obscure Puffer (Takifugu obscurus). *Toxics* 12(1), 48.

Tavares-Dias M., Martins, M.L. 2017. An overall estimation of losses caused by diseases in the Brazilian fish farms. *Journal of Parasitic Diseases* 41(4), 913-918.

Temiz Ö., Kargın F. 2022. Toxicological impacts on antioxidant responses, stress protein, and genotoxicity parameters of aluminum oxide nanoparticles in the liver of Oreochromis niloticus. *Biological Trace Element Research* 200(3), 1339-1346.

Thangapandiyan S., Monika S. 2020. Green synthesized zinc oxide nanoparticles as feed additives to improve growth, biochemical, and hematological parameters in freshwater fish *Labeo rohita*. *Biological Trace Element Research* 195, 636-647.

Thiruppathiraja C., Kumar S., Murugan V., Adaikkappan P., Sankaran K., Alagar M. 2011. An enhanced immuno-dot blot assay for the detection of white spot syndrome virus in shrimp using antibody conjugated gold nanoparticles probe. *Aquaculture* 318, 262-267.

Tokas R., Bhardwaj L.K., Kumar, N., Jindal T., 2024. Nanotechnology for sustainable development and future: a review. *Green and Sustainable Approaches Using Wastes for the Production of Multifunctional Nanomaterials* 221-233.

Tonezzer M. 2020. Detection of mackerel fish spoilage with a gas sensor based on one single SnO2 nanowire. *Chemosensors* 9(1), 2.

Tonezzer M., Thai N.X., Gasperi F., Duy N.V., Biasioli F. 2021. Quantitative Assessment of Trout Fish Spoilage with a Single Nanowire Gas Sensor in a Thermal Gradient. *Nanomaterials* 11, 1604.

Valery C., Artzner F., Robert B., Gulick T., Keller G., Grabielle-Madelmont C., Paternostre M. 2004. Self-association process of a peptide in solution: from β-sheet filaments to large embedded nanotubes. *Biophysical journal* 86(4), 2484-2501.

Verma Y., Rani V., Rana S.V.S. 2020. Assessment of cadmium sulphide nanoparticles toxicity in the gills of a fresh water fish. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* 13, 100280.

Vieira B.B., Mafra J.F., da Rocha Bispo A.S., Ferreira M.A., de Lima Silva F., Rodrigues A.V.N., Evangelista-Barreto N.S. 2019. Combination of chitosan coating and clove essential oil reduces lipid oxidation and microbial growth in frozen stored tambaqui (*Colossoma macropomum*) fillets. *Lwt* 116, 108546.

Wang J.J., Zeng Z.W., Xiao R.Z., Xie T., Zhou G.L., Zhan X.R., Wang S.L. 2011. Recent advances of chitosan nanoparticles as drug carriers. *International journal of nanomedicine* 6, 765.

Wen J.Q., Cai D.W., Ding Y.L., Yu L.S., Huang J.W. 2003. Summary report on experiment of Qiangdi nanometer 863 biological assistant growth unit in sea shrimp farming. *Modern Fisheries Information-Changshu* 18(10), 12–15.

Winayu I.J., Ekantari N., Puspita I.D., Budhijanto W., Nugraheni P.S. 2019. October. The effect of reduced acetic acid concentration on nano-chitosan formulation as fish preservative. In IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering* 633(1), 012040

Yajuan G.U.O., Jungang F.A.N., Jianzhen L.I. 2023. The effect of grape seed extract

nanoparticles/pullulan coatings on the quality of salmon fillets. *Food and Machinery* 39(8), 116-121.

Yazgan H., Ozogul Y., Durmuş M., Balikçi E., Gökdoğan S., Uçar Y., Aksun E.T. 2017. Effects of oil-in-water nanoemulsion based on sunflower oil on the quality of farmed sea bass and gilthead sea bream stored at chilled temperature (2±2 C). *Journal of Aquatic Food Product Technology* 26(8), 979-992.

Yu D., Regenstein J.M., Xia W. 2019. Bio-based edible coatings for the preservation of fishery products: A review. *Critical reviews in food science and nutrition* 59(15), 2481-2493.

Zhang W.H., Zhang W.D. 2008. Fabrication of SnO2–ZnO nanocomposite sensor for selective sensing of trimethylamine and the freshness of fishes. *Sensors and Actuators B:* Chemical 134(2), 403-408.

Zhao J., Lan W., Xie J. 2023. Recent developments in nanoemulsions against spoilage in cold-stored fish: A review. *Food Chemistry* p.136876.

Zhu C., Li L., Liu Q., Li J., Peng G., Zhang L., Qi M., Yang F., Ji H., Dong W. 2023. Effect of selenium nanoparticles (SeNPs) supplementation on the sperm quality of fish after short-term storage. *Aquaculture* 562, 738876.

Ziaei-nejad S., Abaei N.K., Doost B.N., Johari S.A. 2021. Effects of supplemental feeding of common carp (*Cyprinus carpio*) with iron nanoparticles and probiotic Lactobacillus on blood biochemical factors. *Biology Bulletin* 48, 177-184.

Journal of Aquaculture Sciences Vol. 12, No 22, 49-79
Print ISSN: 2322-5351
www.aquaculturesciences.ir

Nanotechnology; A novel and practical approach in aquaculture and seafood products processing

Alireza Rabiepour*, Haniyeh Rostamzad

Fisheries Department, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Guilan, Iran.

*Corresponding author: rabiepooralireza@gmail.com

Received: 3.Feb.2024 **Accepted: 28.Apr.2024**

Abstract

Given the increasing recognition of the vital role of aquatics in producing high-value-added products and enhancing human health, fisheries and aquaculture industries have secured a significant position in the world. Nevertheless, these industries confront numerous challenges such as water pollution, disease outbreaks, slow growth of aquatics, low quality and strength of feed, and many other issues. On the other hand, seafood products are highly perishable due to the presence of compounds such as polyunsaturated fatty acids and proteins; therefore, obtaining new maintenance methods is of particular importance for them. Based on this, nanotechnology can be useful as a cutting-edge technology with multifaceted capabilities to address these challenges. The objective of this research is to investigate the pivotal applications of nanotechnology as an innovative tool across various sectors of aquaculture and seafood products processing. The findings of this study indicate that nanotechnology can be employed in diagnosis and management of aquatics diseases, efficient drug delivery and vaccine production, enhancement of fish growth, augmentation of fishing yield and harvest, aquaculture engineering, biological sediments control and ponds management, water purification and management of aquatic environments. In the realm of seafood products processing, nanostructures such as nanotubes, nanocomposites, nanoemulsions, and nanoliposomes offer diverse applications in encapsulation and controlled release in food products, improving bioavailability and stability, preserving nutritional value, and extending the shelf life of seafood products. Additionally, nano-biosensors, nano-labeling, and nano-coding technologies play crucial roles in ensuring the freshness and quality of seafood products. They facilitate the detection of counterfeit substances, toxins, and allergens, product identification and tracking, risk analysis, and enhanced supply chain management. However, it's worth noting that the unprincipled and excessive use of nanomaterials, along with their uncontrolled release into the environment, can pose health risks to aquatics and humans. Hence, a more accurate and principled approach to nanomaterial management is imperative in this domain.

Keywords: Aquaculture, Nanotechnology, Seafood products processing, Nanoparticles, Sustainable development