مروری جامع بر فناوری‌های نوین بسته‌بندی نانو و کیتوزانی در افزایش ماندگاری خاویار تاسماهیان

ساناز علیپور جورشری، عباس عابدفر*

[۱] گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

خاویار یکی از محصولات استراتژیک و صادراتی صنایع شیلاتی ایران است. این ماده غذایی ارزشمند حاوی مقادیر زیادی اسیدهای چرب امگا ۳ و انواع ویتامین‌های گروه B، A و E است. در سال‌های نه‌چندان دور، دریای خزر به‌عنوان تأمین‌کننده ۹۰ درصد خاویار جهانی شناخته می‌شد. امروزه بیشتر خاویار مصرفی جهان، به‌صورت پرورشی تولید و عرضه می‌شود. در حال حاضر چین یکی از بزرگترین تولیدکنندگان خاویار در جهان است. این محصول غذایی، به‌دلیل ترکیب شیمیایی منحصر به‌فرد، مقدار بالای پروتئین، چربی، وجود بقایای بافتی و همچنین نبود تیمار حرارتی مناسب، مستعد فساد میکروبی و شیمیایی بالایی است. این موضوع در فرایند صادرات خاویار، که عملی زمان‌بر می‌باشد، حائز اهمیت است. روش‌های رایج نگهداری خاویار، مانند افزودن نمک و استفاده از زنجیره سرد، قادر به حفظ کیفیت طولانی مدت و افزایش طول‌عمر خاویار نیستند. تحقیقات اخیر به بررسی اثر استفاده از روش‌های نوین پوشش‌دهی خاویار مانند فناوری نانو و نگهدارنده های طبیعی مانند کیتوزان بر میزان ماندگاری و حفظ کیفیت خاویار پرداخته اند.

واژه‌های کلیدی: *بسته بندی، خاویار، فناوری نانو، کیتوزان، ماندگاری*

ایمیل نویسنده مسئول: a.abedfar@guilan.ac.ir

تاریخ دریافت : ۱۴۰۴/۵/۱۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۶/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۸

۱- مقدمه

ماهیان خاویاری که به نام رایج Sturgeon شناخته می‌شوند، متعلق به خانواده Acipenseridae هستند. این خانواده یکی از دو خانواده زنده در راسته Acipenseriformes است و در کنار ماهیان پاروماهی (Polyodontidae) قرار می‌گیرد. ماهیان خاویاری در چهار سرده Acipenser، Huso، Scaphirhynchus و Pseudoscaphirhynchus دسته‌بندی می‌شوند. این ماهیان به دلیل قدمت طولانی خود شهرت دارند. شواهد فسیلی نشان می‌دهند که این گونه‌ها از قدمتی چند صد میلیون ساله برخوردارند که به ابتدای دوران کرتاسه[1] باز می‌گردد. ماهیان خاویاری در طول تکامل، بسیاری از ویژگی‌های اولیه خود، مانند فلس‌های لوزی‌شکل و استخوان‌های سپرمانند را حفظ

[1] Cretaceous

کرده‌اند، اما دندان‌هایشان را از دست داده و به شکل امروزی تغییر یافته‌اند. به دلیل تغییرات اندک طی هزاران سال، ماهیان خاویاری به‌عنوان "فسیل زنده" شناخته می‌شوند. در حال حاضر، بیشتر جمعیت‌های وحشی ماهیان خاویاری در معرض خطر قرار دارند و نیازمند تدابیر حفاظتی هستند. این وضعیت ناشی از مجموعه‌ای از عوامل زیستی، بوم‌شناختی و اقتصادی است که این گونه‌ها را در برابر صید بی‌رویه و شکار غیرقانونی آسیب‌پذیر کرده است. ویژگی‌هایی همچون رشد کند و بلوغ جنسی دیرهنگام باعث کاهش نرخ افزایش جمعیت ماهیان خاویاری شده و آن‌ها را در برابر بهره‌برداری بیش از حد آسیب‌پذیر می‌سازد. فعالیت‌های انسانی مانند ساخت سدها، لایروبی و کانال‌سازی رودخانه‌ها نیز از دیگر عوامل کاهش جمعیت این ماهیان است. زیستگاه اصلی ماهیان خاویاری در دریای خزر و آب‌های ساحلی و شیرین نیمکره شمالی است. درگذشته، بزرگترین تولیدکنندگان خاویار کشورهای روسیه و ایران بودند. در دهه اخیر، پرورش ماهی خاویاری رشد سریعی داشته است.

این پیشرفت با حمایت از تحقیقات علمی در زمینه پرورش، مدیریت منابع ژنتیکی و کنترل بیماری‌ها، به منظور بهینه‌سازی تولید و تضمین پایداری، همراه بوده است امروزه، چین، ایتالیا، فرانسه، ایالات متحده آمریکا و ایران از جمله کشورهای اصلی تولیدکننده خاویار هستند. چین به عنوان بزرگترین تولیدکننده و صادرکننده ماهیان خاویاری شناخته می‌شود. [۱-۳].

خاویار یکی از محصولات مهم صنایع شیلاتی به لحاظ تغذیه ای، اقتصادی و صادراتی است. دریای خزر به‌عنوان بزرگ‌ترین منبع تولیدکننده خاویار با کیفیت، شهرتی جهانی دارد و در گذشته نه‌چندان دور، بیش از ۹۰ درصد تولید جهانی خاویار را تأمین می‌کرد [۴]. خاویار همواره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اقلام صادرات غیرنفتی ایران شناخته شده است. در شرایطی که طی دهه‌های اخیر نفت، نقش اصلی را در تأمین درآمد اقتصادی کشور ایفا می‌کرد، کاهش شدید صادرات نفت ناشی از تحریم‌ها، اهمیت تمرکز بر سایر اقلام صادراتی را دوچندان کرده است. در این میان، صادرات محصولات استراتژیک مانند خاویار، به دلیل نقش برجسته آن در ارزآوری و تأثیرات مثبت اقتصادی، نیازمند توجه ویژه است. این شرایط ضرورت انجام پژوهش‌های مرتبط را برای توسعه این صنعت، افزایش اشتغال‌زایی و تضمین امنیت غذایی پایدار در کشور را برجسته‌تر می‌سازد [۵].

گسترش تکثیر و پرورش ماهیان خاویاری با هدف تولید گوشت ماکیان بعنوان یک پارامتر استراتژیک سبب افزایش ارزآوری و نرخ صادرات در کشور میگردد که ضمن کاهش فشار بر ذخایر طبیعی پتروشیمی، به سرعت گردش چرخه اقتصاد کشور کمک شایانی خواهد نمود. اقلیم مناسب برای پرورش این ماهیان، هزینه‌های پایین‌تر تأسیسات نسبت به کشورهای اروپایی، دانش فنی پیشرفته، تجربه بالا و شهرت ایران به‌عنوان تولیدکننده بهترین خاویار جهان، همگی باعث شده‌اند که این

صنعت از ارزش اقتصادی بالایی برخوردار باشد. با این حال، باید اذعان کرد که کشورهایی نظیر چین، روسیه، ایالات متحده آمریکا، آلمان و فرانسه در این حوزه پیش‌رو بوده و به‌سرعت در حال توسعه این صنعت هستند [۶].

بر اساس گزارش‌های سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) و داده‌های سایت این سازمان در سال ۲۰۱۴، نرم‌افزار FishState پیش‌بینی کرده بود که تولید جهانی در سال ۱۳۹۲ به بیش از ۶۶ هزار تن گوشت و حدود ۲۶۰ تن خاویار پرورشی برسد. علاوه بر این، میزان تولید خاویار پرورشی در سال ۲۰۱۶ حدود ۴۸۶ تن برآورد شده و پیش‌بینی شده است که طی ده سال آینده به ۵۰۰ تا ۷۵۰ تن افزایش یابد[۷].

خاویار یک ماده‌ی غذایی مقوی، با طعمی مطلوب و بویی خوشایند است که از گذشته‌های دور به عنوان یک خوراک گران‌قیمت در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته مورد توجه قرار گرفته است. خاویار، یکی از محصولات مهم شیلاتی ایران است که به دلیل ارزش تغذیه‌ای، اقتصادی و صادراتی خود شناخته می‌شود. این ماده ارزشمند حاوی مقادیر زیادی پروتئین (۲۸-۲۲ درصد) ، چربی (۷۸-۱۵درصد) ، اسیدهای چرب امگا ۳، انواع مختلف ویتامین‌های گروه B، A و E و مواد معدنی مانند سدیم، پتاسیم، فسفر، آهن و کلیسم است [۱۰-۸]. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که ترکیب اسیدهای آمینه خاویار بسته به گونه، رژیم غذایی، زیستگاه و سن ماهی متفاوت است. خاویار ماهیان خاویاری منبع مهمی از اسیدهای آمینه ضروری و غیرضروری است. تجزیه و تحلیل پروفایل اسیدهای آمینه نشان داده است که خاویار از نظر تغذیه‌ای بسیار متعادل و کامل است و تمام اسیدهای آمینه ضروری را که بدن انسان قادر به سنتز آنها نیست، تأمین می کند [۳].

به طور عمده پروتئین موجود در خاویار متشکل از اسیدهای آمینه آرژنین، هیستامین، ایزولوسین، لیزین و متیونین است. چربی موجود در خاویار به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود که شامل ۲۵درصد کلسترول و ۷۵درصد لسیتین است [۲]. میزان رطوبت موجود در خاویار بر بافت و ماندگاری آن تأثیر می‌گذارد، به طوریکه رطوبت بیشتر می‌تواند منجر به بافت نرم‌تر و عمر مفید کوتاه‌تر شود. در ماهیان خاویاری، میزان تقریبی رطوبت در تخم تازه بین ۴۵ تا ۶۵ درصد بسته به گونه، متفاوت است. در خاویار فرآوری‌شده، میزان رطوبت بستگی به میزان نمک دارد که در فرآیند آماده‌سازی به آن اضافه می‌شود. خاویار حاوی لیپیدهایی از نوع لینولئیک اسید غیر اشباع است که برای حفظ سلامت انسان اهمیت دارند. علاوه بر این مشخص شده است که این ماده، غنی از DHA (اسید دوکوزاهگزانوئیک، C22:6n-3) و EPA (اسید ایکوساپنتانوئیک، C20:5n-3) است که نقش مهمی در پیشگیری و درمان بیماری‌های قلبی-عروقی دارند. همچنین خاویار، به عنوان "طلای مغز" نیز شناخته می‌شود زیرا ثابت شده است که موجب بهبود ضریب

هوشی (IQ) و پیشگیری از زوال عقل ناشی از پیری می‌شود [۳].

خاویار حاوی ترکیبی به نام کتاکتوزان[2] است که نوعی الکل چرب با زنجیره بلند محسوب می‌شود و در بدن به اسیدهای چرب تبدیل می‌شود. این اسیدهای چرب نقش مهمی در سنتز میلین، پوشش سلول‌های عصبی دارند. بنابراین، مصرف خاویار تأثیر زیادی بر سلامت سلول‌های عصبی دارد. علاوه بر این، خاویار از نظر عنصر آهن غنی است که استفاده از آن در افراد مبتلا به کم خونی ناشی از فقر آهن توصیه می‌شود [۲]. جدول (۱) به مقایسه ارزش غذایی خاویار بلوگا و خاویار سالمون می‌پردازد. خاویار بلوگا نسبت به خاویار سالمون دارای چربی، رطوبت و انرژی بیشتری است، در حالی‌که خاویار سالمون پروتئین بیشتری دارد. انتخاب بین این دو بستگی به نیازهای غذایی و ترجیحات شخصی دارد. اگر هدف افزایش پروتئین است، خاویار سالمون گزینه بهتری است، در حالی که برای کسانی که به انرژی و چربی بیشتر نیاز دارند، خاویار بلوگا ممکن است مناسب‌تر باشد [۱۱].

جدول ۱: مقایسه ارزش غذایی خاویار بلوگا و خاویار سالمون [۱۱].

متغیر	خاویار بلوگا	خاویار سالمون
پروتئین(g/۱۰۰g)	۲۴/۷	۲۶/۸
چربی	۱۵/۹	۱۲/۷
رطوبت	۴۸/۴	۴۵/۱
خاکستر	۴/۱	۷/۱
کربوهیدرات	۶/۹	۸/۳
انرژی(KJ/۱۰۰g)	۱۳۲۷	۱۲۷۳

فساد محصولات شیلاتی در پی عوامل مختلفی اتفاق می‌افتد که این عوامل ممکن است فیزیکی شیمیایی آنزیمی و یا میکروبی باشند. خاویار مستعد فساد میکروبی و شیمیایی بسیار بالایی است. علت این امر بالا بودن میزان پروتئین و چربی خاویار، وجود بقایای بافتی تخمدان در آن و عدم پاستوریزاسیون مناسب است [۱۲].

فساد خاویار ناشی از رشد و فعالیت‌های متابولیکی میکروبی، منجر به تولید ترکیباتی مانند آمین‌ها، سولفیدها، الکل‌ها، آلدهیدها، کتون‌ها و اسیدهای آلی می‌شود که طعم و بوی نامطلوبی ایجاد می‌کنند. این نوع فساد میکروبی ممکن است با تغییر رنگ محصول یا به‌صورت ساده‌تر از طریق تشکیل کلنی‌های میکروبی

[2] Ctacosand

شناسایی شود [۱۳]. جلوگیری از فساد خاویار و افزایش ماندگاری آن از موضوعات حیاتی برای کشورهای تولیدکننده و صادرکننده خاویار است. از آنجا که فرآیند صادرات خاویار زمان‌بر است، خطر فساد این محصول افزایش می‌یابد. با این حال، روش‌های نگهداری و بسته‌بندی فعلی خاویار منجر به برخی عواقب نامطلوب شده است. بنابراین، نیاز است تا به طور جدی این محصول غذایی ارزشمند توسط روش‌های نوین نگهداری تحت کنترل قرار گیرد تا از اثرات منفی فساد و مسمومیت غذایی پیشگیری بعمل آید [۲, ۱۴].

در سال‌های اخیر، استفاده از بسته بندی‌های خوراکی به عنوان حامل افزودنی‌های غذایی و ترکیبات ضد میکروبی در محصولات شیلاتی مورد توجه قرار گرفته است [۱۵]. بسته‌بندی یکی از اجزای کلیدی در فرآیند تولید مواد غذایی است که نقش اصلی آن محافظت از محصولات در برابر آسیب‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی است. بسته‌بندی‌های سنتی معمولاً به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که به‌عنوان موانع غیرفعال عمل کرده و از تأثیرات محیطی بر مواد غذایی جلوگیری می‌کنند [۱۴].

یکی از جنبه‌های اساسی در حفظ بهداشت مواد غذایی، افزایش ماندگاری خاویار با رعایت اصول مشتری‌محوری است که به‌عنوان یکی از اهداف کلیدی در سیستم‌های پیشرفته مدیریت مواد غذایی مطرح می‌شود. اهمیت حفظ کیفیت در راستای رضایت مشتریان تا جایی پیش رفته که سازمان غذا و داروی آمریکا (FDA[3]) مفهوم کیفیت را فراتر از تعاریف فنی و تخصصی، بر اساس نیازها و انتظارات مشتریان تعریف کرده است. در این راستا، عواملی مانند: رنگ، بو، بافت و استفاده از مواد نگهدارنده باید با تمرکز بر رضایت مصرف‌کننده تنظیم شوند. افزایش آگاهی عمومی و دسترسی به منابع علمی در مورد اثرات منفی مواد نگهدارنده شیمیایی، گرایش به استفاده از نگهدارنده‌های طبیعی، ایمن و سازگار با بدن را افزایش داده است. بر این اساس، استفاده از نگهدارنده‌های طبیعی برای حفظ کیفیت خاویار، بیش از پیش اهمیت پیدا کرده است. به‌منظور افزایش ماندگاری خاویار، نه‌تنها باید از این نوع نگهدارنده‌ها بهره برد بلکه با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته، نظیر فناوری نانو، استفاده از نگهدارنده‌ها به حداقل میزان ممکن کاهش یابد. این رویکرد درکشورهای توسعه‌یافته‌ای مانند ایالات متحده آمریکا به‌طور ویژه دنبال می‌شود و به‌دلیل محدودیت‌های قانونی در مصرف مجاز نگهدارنده‌های طبیعی، اهمیت مضاعفی پیدا کرده است [۵].

در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای درباره انواع روش‌های نگهداری مواد غذایی دریایی از جمله خاویار انجام شده است. با این وجود، روش‌هایی نظیر بسته‌بندی با اتمسفر اصلاح‌شده (MAP) و بسته‌بندی تحت فشار هیدرواستاتیک بالا، توانایی کافی برای کاهش قابل توجه میکروارگانیسم‌ها، جلوگیری از اکسیداسیون چربی‌ها و مهار فعالیت آنزیمی را ندارند. بنابراین،

[3] Food and Drug Administration

استفاده از روش‌های بسته‌بندی مبتنی بر نانوذرات برای غلبه بر این چالش‌ها، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۱۶-۱۸].

در سال‌های اخیر، به منظور رفع چالش‌های اقتصادی و زیست‌محیطی ناشی از کاربرد پلیمرهای مصنوعی در صنعت، پلیمرهای طبیعی در قالب فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی و غیرخوراکی به عرصه بسته‌بندی راه یافته‌اند. به دلیل ضعف‌های نسبی در عملکرد پلیمرهای طبیعی، از نانوذرات برای تقویت شبکه پلیمری آن‌ها استفاده می‌شود که موجب بهبود ویژگی‌های مکانیکی، فیزیکی و مقاومت میکروبی در محصولات بسته‌بندی می‌شود. امروزه، بهره‌گیری از فناوری نانو در صنعت بسته‌بندی، به‌ویژه در پلیمرهای زیستی، توانسته است کارایی مواد بسته‌بندی را افزایش داده و در نتیجه، ایمنی مواد غذایی و دارویی را ارتقاء بخشد [۱۹].

نانوفناوری یکی از فناوری‌های پیشرفته است که به کنترل و تغییر مواد در مقیاس اتمی، مولکولی یا ماکرومولکولی می‌پردازد، جایی که اجزای مؤثر بر ویژگی‌های ماده، ابعادی در حدود ۱۰۰ نانومتر یا کمتر دارند. بسته‌بندی نانو، موجب کاهش بار میکروبی و افزایش ماندگاری محصولات غذایی می‌شود. نانوذرات با اندازه کمتر از ۵۰ نانومتر، به دلیل نسبت بالاتر مساحت سطح به حجم، فعالیت ضد میکروبی بیشتری از خود نشان می‌دهند [۲۰].

این فناوری را می‌توان در سه نوع بسته‌بندی به کار برد؛ دسته نخست بسته‌بندی‌هایی که از نانوپرکننده‌ها (نانوفیلرها) بهره می‌برند؛ دسته دوم بسته‌بندی‌هایی که حاوی نانوذرات با خاصیت ضد میکروبی هستند و دسته سوم بسته‌بندی‌هایی که شامل نانوحسگرها و نانوسنسورها می‌شوند [۱۹]. فناوری بسته‌بندی نانویی، کیفیت و ایمنی مواد غذایی را بهبود داده و تحولی در بسته‌بندی محصولات صادراتی ایجاد کرده است. در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی، استفاده از پلاستیک‌های پیشرفته تولیدشده با فناوری نانو نیز رایج است. یکی از چالش‌های اصلی در بسته‌بندی مواد غذایی، نفوذ اکسیژن است که منجر به اکسیداسیون چربی‌ها، کاهش کیفیت و تغییر رنگ مواد غذایی می‌شود. در این پلاستیک‌های پیشرفته، نانوذرات به گونه‌ای چیده می‌شوند که مسیرهای زیگزاگی برای عبور اکسیژن ایجاد کنند، در نتیجه زمان نفوذ گاز افزایش یافته و ماندگاری مواد غذایی فسادپذیر بیشتر می‌شود. به این ترتیب، محصولات غذایی برای مدت طولانی‌تری تازه و باکیفیت باقی می‌مانند [۲۱]. در روش بسته بندی نانوذرات، از دو گروه مواد آلی و معدنی استفاده می‌شود. مواد معدنی به دلیل پایداری بالا در شرایط فرآوری در مقایسه با مواد آلی محبوبیت بیشتری پیدا کرده‌اند [۲۲].

استفاده از نانوذرات معدنی نقره، مس و دی‌اکسید تیتانیوم به دلیل تحمل شرایط سخت و خواص ضد میکروبی قوی در بسته‌بندی مواد غذایی در حال افزایش

است. نانوذرات نقره(Ag-NPs) به‌عنوان مهارکننده‌های قوی طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها شناخته شده‌اند. نانوذرات نقره با گروه‌های تیول موجود در آنزیم‌های میکروارگانیسم‌ها واکنش داده و باعث دناتوره شدن آنزیم‌ها و در نهایت مرگ سلول می‌شوند. بسته‌بندی‌های حاوی نانوذرات نقره با آزادسازی یون‌های نقره و تولید گونه های فعال اکسیژن، رشد میکروارگانیسم‌ها را کاهش داده یا متوقف کرده و از این طریق، ماندگاری و کیفیت مواد غذایی را افزایش می‌دهند. اندازه کوچک‌تر نانوذرات، سطح بزرگ‌تر و تعامل بهتری با میکروارگانیسم‌ها را فراهم می‌کند. در این راستا، نانوذرات نقره نیز به دلیل ابعاد بسیار کوچک و ویژگی‌های منحصر به‌فرد خود، به‌عنوان ابزاری کارآمد برای بهبود ماندگاری ایمنی مواد غذایی شناخته می‌شوند. نانوذرات نقره، به دلیل پایداری بالای دمایی امکان ادغام در ساختارهای مختلف را دارند.

نانوذرات مس (Cu-NPs) به دلیل خواص ضد میکروبی، ضد سمی، پایداری شیمیایی، مقاومت حرارتی و قیمت پایین در نانوبسته‌بندی مواد غذایی کاربرد فراوانی دارند. فیلم‌های حاوی نانوذرات مس به دلیل حضور ذرات مس در ساختار خود، به طور هم‌زمان دو ویژگی بسیار مطلوب، یعنی مقاومت در برابر خوردگی و محافظت در برابر بار الکتریسیته ساکن را ارائه می‌دهند. البته، مورفولوژی، اندازه، نحوه پراکنش و درصد وزنی این ذرات تأثیر قابل توجهی بر این ویژگی‌ها دارند [۲۳]. مکانیسم‌های ضد میکروبی آن شامل تجمع در دیواره سلولی و افزایش استرس اکسیداتیو است. این مواد به دلیل خواص کاتالیزوری، سطحی و فعالیت‌های ضد ویروسی و ضد باکتریایی، گزینه‌ای اقتصادی‌تر نسبت به نانوذرات نقره محسوب می‌شوند. دی اکسید تیتانیوم (Tio2) یکی از اجزای مهم فیلم‌های نانوکامپوزیتی است. دی اکسید تیتانیوم، به دلیل خواص فوتوکاتالیستی خود در ترکیب با نانوذرات نقره، اثر هم‌افزایی ایجاد کرده و اثرات ضد باکتریایی فیلم‌های نانوکامپوزیتی را به طور مؤثری افزایش دهد. همچنین Tio2، آزادسازی یون‌های نقره را تسهیل می‌کند و اثربخشی پوشش نانویی را در مهار رشد میکروبی بهبود می‌بخشد. TiO2 به دلیل پایداری شیمیایی و زیست‌سازگاری و ضد میکروبی قوی، به طور گسترده در نانوبسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شود. روش‌های مختلفی برای سنتز ذرات در مقیاس نانو استفاده شده است، برای مثال جهت سنتز نانوذرات نقره از تابش مایکروویو، تجزیه حرارتی و سنتز سونوشیمیایی و برای سنتز نانوذرات مس از دستکاری دمای واکنش در حلال‌های آلی استفاده می‌شود. رایج‌ترین روش سنتز این نانوذرات، احیای شیمیایی است [۱۴].

مواد نگهدارنده طبیعی، برخلاف انواع مصنوعی، بیشتر مورد توجه مصرف‌کنندگان است. از جمله این مواد می‌توان به لاکتوپراکسیداز، لیزوزیم و کیتوزان اشاره کرد که به‌ترتیب در شیر، سفیده تخم‌مرغ و سلول‌های میگو یافت می‌شوند.

کیتوزان، یک پلی‌ساکارید طبیعی و نانوکیتوزان مشتق‌شده از آن، به دلیل ویژگی‌هایی مانند غیرسمی بودن، خواص مکانیکی و ضد میکروبی، سازگاری با بافت‌های زنده و قابلیت تجزیه‌پذیری، توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. نانوذرات کیتوزان به عنوان نانوذرات پلیمری و زیستی آینده‌دار، در دهه‌های اخیر به شکل چشم‌گیری مورد توجه قرارگرفته‌اند. نانوکیتوزان به دلیل ویژگی‌های منحصر به‌فرد بیولوژیکی و فیزیولوژیکی، از جمله حلالیت بالا، زیست‌سازگاری، زیست‌تخریب‌پذیری و واکنش‌پذیری، کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف مانند پزشکی، صنایع دارویی و غذایی، آرایشی، کشاورزی، صنایع نساجی، کاغذ و بسته‌بندی، انرژی و توسعه پایدار صنعتی پیدا کرده است. کیتوزان که با نام علمی poly-β-1-4-n-acetyl-d-glucosamine شناخته می‌شود، یک کوپلیمر متشکل از گلوکزآمین و N‌استیل-D-گلوکزآمین است که از داستیله شدن قلیایی کیتین به‌دست می‌آید.

این ترکیب نخستین بار در سال ۱۸۵۹ میلادی توسط روگت کشف شد. کیتین، عضوی از خانواده موکوپلی‌ساکاریدها، پس از سلولز به‌عنوان دومین پلی‌ساکارید فراوان در طبیعت شناخته می‌شود و به طور گسترده در اسکلت خارجی بندپایانی مانند میگو و خرچنگ و همچنین در میکروارگانیسم‌های نظیر مخمرها یافت می‌شود. این ماده برای نخستین بار در سال ۱۸۱۱ میلادی توسط براکونوت بررسی و توصیف شد.

کیتوزان، مشتقی از کیتین، به دلیل کاربردهای گسترده و خواص زیستی منحصر به‌فردش، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. ویژگی‌هایی مانند ساختار ماکرومولکولی، زیست‌سازگاری، زیست‌تخریب‌پذیری، حلالیت و واکنش‌پذیری بالا، این پلیمر زیستی را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای متنوع تبدیل کرده‌اند.

نانوذرات کیتوزان به دلیل اندازه کوچک و نسبت بالای سطح به حجم، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، زیستی و ضدباکتریایی برتری نسبت به فرم توده‌ای خود دارند. این نانوذرات همچنین به دلیل خصوصیاتی مانند استحکام، پایداری، دسترس‌پذیری آسان، سطح ویژه بالا و توانایی برقراری پیوندهای بیشتر در شبکه، خواص مکانیکی و حرارتی مناسبی از جمله انعطاف‌پذیری و سختی دارند که آن‌ها را برای کاربردهایی همچون صنعت بسته‌بندی مواد غذایی بسیار مناسب می‌کند. برای تولید نانوذرات کیتوزان، روش‌های مختلفی از جمله ژل یونی، میکروامولسیون، خشک‌کردن اسپری، روش میسل معکوس، نفوذ حلال امولسیفیه و روش کمپلکس پلی‌الکترولیت به کار می‌روند [۱۹]. کیتوزان به‌راحتی به شکل فیبر، فیلم یا پوشش تبدیل می‌شود. کارایی و ویژگی‌های کیتوزان به وزن مولکولی و ویسکوزیته آن وابسته است [۲۰].

عوامل مختلفی می‌توانند بر فعالیت ضد میکروبی کیتوزان تأثیرگذار باشند. به عنوان نمونه، مشخص شده است که کیتوزان با وزن مولکولی کمتر از ۱۰ کیلودالتون، خاصیت ضد باکتریایی بیشتری نسبت به

کیتوزان طبیعی دارد. همچنین، حداقل درجه پلیمریزاسیون برای حفظ فعالیت ضد میکروبی باید ۷ باشد و در مقادیر کمتر از این، تقریباً هیچ خاصیت ضد میکروبی مشاهده نمی‌شود. کیتوزان‌هایی که سطح داستیلاسیون بالاتری دارند، به دلیل حلالیت و تراکم بار بیشتر، فعالیت ضدباکتری بیشتری نسبت به انواع دارای گروه‌های آمینی استیله شده نشان می‌دهند. pH محیط نیز بر عملکرد کیتوزان تأثیرگذار است و کاهش pH می‌تواند فعالیت ضد میکروبی را تقویت کند. ماتریکس محیط یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر فعالیت ضد میکروبی کیتوزان است. به دلیل خاصیت کاتیونی، کیتوزان قابلیت بالایی در اتصال به ترکیبات مختلف مانند آلژینات‌ها، پکتین‌ها، پروتئین‌ها و پلی‌الکترولیت‌های غیر آلی مانند پلی‌فسفات دارد. علاوه بر این، استفاده از الکترولیت‌های با وزن مولکولی کم، مانند سدیم فسفات و آنیون‌های آلی، می‌تواند حلالیت کیتوزان را افزایش دهد. تأثیر وزن مولکولی کیتوزان بر فعالیت ضد باکتریایی و ضد قارچی نیز بررسی شده است. استفاده از کیتوزان با وزن مولکولی ۱۰،۰۰۰ تا ۱۰۰،۰۰۰ برای مهار رشد میکروبی مؤثر گزارش شده است. همچنین، کیتوزان با وزن مولکولی حدود ۹۳۰۰ می‌تواند رشد ایکلی را مهار کند، در حالی که کیتوزان با وزن مولکولی ۲۲۰۰ موجب تسریع رشد باکتری می‌شود. علاوه بر این، فعالیت ضد میکروبی به ترتیب در O، N-کربوکسی‌متیل کیتوزان، کیتوزان و O-کربوکسی‌متیل کیتوزان افزایش می‌یابد [۲۴].

هدف از این مطالعه مروری، بررسی اثر انواع پوشش‌های نانو و کیتوزانی حاوی مواد معدنی و نگهدارنده‌های طبیعی مختلف، بر میزان ماندگاری، کیفیت و خواص حسی خاویار است. همچنین میزان مهاجرت برخی نانوذرات از بسته بندی به این ماده غذایی نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

بسته‌بندی حاوی پوشش کیتوزان همراه با لیزوزیم، اسید استیک و نانوذرات ناتامایسین

بطور کلی، از نگهدارنده‌های طبیعی و مجاز مانند کیتوزان، اسید استیک، لیزوزیم و ناتامایسین در اشکال نانو و غیرنانو برای افزایش ماندگاری خاویار استفاده شد. این ترکیبات غیرسمی، سازگاری بالایی با بدن دارند. همچنین جزو نگهدارنده‌های GRAS[4] و مورد تایید کمیته مشترک سازمان کشاورزی و بهداشت جهانی (JECFA[5]) نیز می‌باشند.

در این مطالعه ۹ تیمار مختلف حاوی کیتوزان و نمونه شاهد طی مدت ۱۵۰ روز نگهداری در دمای ۰ تا ۳- درجه سانتیگراد در بازه‌های زمانی ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۵۰ روز از نظر فاکتور میکروبی (شمارش کلی، کپک و مخمر)، فاکتور شیمیایی (تیوباربیتوریک اسید، بازهای ازت فرار، عدد پراکسید و اسیدهای چرب فرار) و فاکتور ارگانولپتیکی برررسی شدند. ترکیب تیمارها به شرح جدول (۲) است. فرآیند تولید خاویار شامل مراحل صید، انتقال و استحصال خاویار از شکم ماهی در

[4] - Generally Recognized As Safe
[5]- Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives

شرایط بهداشتی می‌باشد و سپس با شستشو، نمک‌زنی و بسته‌بندی در ظروف استاندارد به پایان می‌رسد. در این تحقیق، روند تولید خاویار مشابه روش‌های استاندارد انجام شد، با این تفاوت که پس از نمک‌زنی (به میزان ۴ درصد وزن خاویار)، نمونه‌ها به مدت ۱۲۰ دقیقه در سوسپانسیونی حاوی کیتوزان و ترکیبات دیگر قرار داده شدند تا این مواد به خوبی توسط تخم‌های خاویار جذب شوند.

جدول ۲: تیمارهای پوشش داده شده با کیتوزان و نمونه شاهد [۲].

تیمار	ترکیب تیمارها
۱	کیتوزان + ناتامایسین ۲۰ + اسید استیک ۱٪ + لیزوزیم ۱۰۰
۲	کیتوزان + ناتامایسین ۲۰ + اسید استیک ۱٪ + لیزوزیم ۲۰۰
۳	کیتوزان + ناتامایسین ۴۰ + اسید استیک ۱٪ + لیزوزیم ۱۰۰
۴	کیتوزان + ناتامایسین ۴۰ + اسید استیک ۱٪ + لیزوزیم ۲۰۰
۵	کیتوزان + نانو ناتامایسین ۲۰ + اسید استیک ۱٪ + لیزوزیم ۱۰۰
۶	کیتوزان + نانو ناتامایسین ۲۰ + اسید استیک ۱٪ + لیزوزیم ۲۰۰
۷	کیتوزان + نانو ناتامایسین ۴۰ + اسید استیک ۱٪ + لیزوزیم ۱۰۰
۸	کیتوزان + نانو ناتامایسین ۴۰ + اسید استیک ۱٪ + لیزوزیم ۲۰۰
۹	کیتوزان
۱۰۱۰	نمونه شاهد دارای نمک خالص و فاقد کیتوزان، ناتامایسین، اسید استیک و لیزوزیم

بر اساس نتایج این تحقیق، نظر به اینکه سرعت رشد میکروبی تیمارهای ۱، ۲، ۳، ۵، ۶، ۷ و۸ در محدوده بین تیمارهای ۴ و ۹ قرار داشت و عملکرد نانوناتامایسین ۲۰ppm مشابه ناتامایسین ۴۰ppm بود، مقایسه‌ها بیشتر بر تیمار ۴ و تیمار ۹ در برابر نمونه شاهد متمرکز شد. طبق جدول (۳) و (۴) پوشش‌های کیتوزانی به صورت معناداری ($p<۰/۰۵$) موجب کاهش سرعت رشد بار میکروبی، کپک و مخمر در مقایسه با نمونه شاهد شدند. از طرفی، تیمارهای پوشش داده شده با کیتوزان به رغم داشتن شدت و ضعف در رشد، دارای تفاوت معناداری ($p<۰/۰۵$) نبودند. از میان تیمارها، تیمار ۴ کمترین میزان رشد میکروبی، کپک و مخمر را نشان داد و در حفظ کیفیت خاویار طی ۱۵۰ روز عملکرد بهتری نسبت به تیمار ۹ داشت. عملکرد مناسب تیمار ۴ را می‌توان به وجود ناتامایسین به‌عنوان یک ضد قارچ طبیعی، در افزایش ماندگاری خاویار نسبت داد. به‌ویژه ناتامایسین با غلظت ۴۰ ppm بهترین نتیجه را ارائه کرد. در مقابل لیزوزیم که یک آنتی‌باکتریال

تخصصی برای باکتری‌های گرم مثبت است، تأثیر چشم‌گیری در افزایش ماندگاری خاویار نداشت، که این امر به دلیل محدود بودن طیف فعالیت ضدباکتریایی آن می‌باشد.

جدول ۳: تغییرات بارمیکروبی تیمارهای خاویار و نمونه شاهد در زمان نگهداری [۲].

زمان ماندگاری(روز)/ لوگ کلنی در هر گرم	شاهد	تیمار ۹	تیمار۴
۳۰	۴/۲	۳/۸۷	۳/۳
۶۰	۵/۳	۴/۳۲	۴/۱
۹۰	۵/۳۸	۴/۵۹	۴/۵
۱۵۰	۵/۷۸	۵/۰۴	۴/۸

جدول (۴). تغییرات رشد کپک و مخمر تیمارهای خاویار و نمونه شاهد در زمان نگهداری [۲].

زمان ماندگاری(روز)/ لوگ کلنی در هر گرم	شاهد	تیمار ۹	تیمار۴
۳۰	۳/۳۱	۲/۶	۲/۲
۶۰	۴/۳	۲/۹	۲/۶
۹۰	۴/۷	۳/۸	۳/۴
۱۵۰	۷/۹	۴/۵	۳/۹

در تمامی نمونه‌های خاویار، اعم از شاهد و پوشش‌دار، مقدار تیوباربیوتوریک اسید (TBA)، به‌عنوان شاخص اکسیداسیون چربی، طی دوره نگهداری به صورت افزایشی مشاهده شد. این افزایش در نمونه‌های شاهد به مراتب سریع‌تر از نمونه‌های پوشش‌دار با کیتوزان بود و نوع پوشش نقش چشم‌گیری در کاهش سرعت این روند ایفا کرد. با افزایش مدت نگهداری، بازهای ازت فرار کل در همه نمونه‌ها افزایش یافت، اما این روند در نمونه‌های پوشش داده شده با کیتوزان کندتر بود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که پوشش کیتوزانی در کنترل بازهای ازت فرار کل مؤثر است و می‌تواند کیفیت خاویار را حداقل تا ۶۰ روز حفظ کند. شاخص پراکسید نیز از جمله معیارهای اکسیداسیون چربی است که در طول زمان در تمام نمونه‌ها افزایش یافت. با این حال، افزایش آن در نمونه‌های پوشش داده شده با کیتوزان کندتر بود. حتی پس از ۱۵۰ روز نگهداری، مقدار پراکسید در تیمارهای کیتوزانی کمتر از نمونه شاهد در روز ۹۰ بود. این نتایج نشان‌دهنده نقش مهم پوشش‌های کیتوزانی در کاهش میزان اکسیداسیون چربی و حفظ بهتر کیفیت تیمارهای خاویار نسبت به نمونه شاهد است.

در طول دوره نگهداری خاویار، میزان اسیدهای چرب آزاد (FFA) که حاصل تجزیه چربی‌ها است، روند افزایشی را نشان داد. با این حال، این افزایش در نمونه‌هایی که با کیتوزان پوشش داده شده بودند، به‌طور قابل توجهی کندتر بود. در روز ۱۵۰، مقدار FFA در

نمونه‌های تیمارشده با کیتوزان ۴ و ۹ به‌ترتیب ۱/۳۹ درصد و ۱/۸۸ درصد اندازه‌گیری شد، که این مقادیر حتی کمتر از میزان FFA نمونه شاهد در روز ۹۰ (۲/۱۲ درصد) بود. علاوه بر این، در تمامی نمونه‌ها مقدار FFA زیر حد مجاز استاندارد (۴-۳ درصد اولئیک اسید) باقی ماند. ارزیابی خواص حسی نمونه‌ها نشان داد که تفاوت معناداری ($p<0/05$) بین نمونه شاهد و تیمارهای مختلف کیتوزان وجود ندارد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پوشش کیتوزان، علاوه بر افزایش ماندگاری، تأثیری منفی بر طعم، بو یا بافت خاویار نداشته و کیفیت حسی محصول به خوبی حفظ شده است.

نتایج این پژوهش نشان داد که پوشش کیتوزان با کاهش سرعت اکسیداسیون چربی و تشکیل اسیدهای چرب آزاد، ضمن حفظ کیفیت بافت و طعم خاویار، ماندگاری محصول را حداقل تا ۶۰ روز افزایش می‌دهد. ترکیب کیتوزان با ناتامایسین ۴۰ ppm اثر هم‌افزایی قابل‌توجهی داشت و ماندگاری را تا ۹۰ روز افزایش داد. همچنین، استفاده از نانوناتامایسین ۲۰ ppm، عملکرد مشابهی با ناتامایسین غلظت ۴۰ ppm داشته، که نشان‌دهنده نقش مؤثر نانوفناوری در کاهش میزان مصرف نگهدارنده‌هاست.

یافته‌های این پژوهش بر اثربخشی کیتوزان به‌عنوان یک نگهدارنده طبیعی، زیست‌تجزیه‌پذیر و مورد تأیید سازمان‌های معتبر مانند FDA و JECFA تأکید می‌کند. این نوع پوشش‌ها، می‌تواند بدون نیاز به تیمار حرارتی، ماندگاری خاویار را افزایش داده و به‌ویژه در فرآیندهای صادراتی که زمان‌بر هستند، کاربرد قابل‌توجهی داشته باشد. در نهایت، استفاده از پوشش‌های طبیعی ضدمیکروبی و آنتی‌اکسیدانی، به‌صورت مستقل یا در ترکیب با اسیدهای آلی، امکان بهبود کیفیت حسی، کاهش محصولات اکسیداسیون و افزایش ماندگاری خاویار و سایر محصولات غذایی مشابه را فراهم می‌کند [۲].

بسته‌بندی حاوی نانوذرات $Ag\text{-}TiO_2$

در این پژوهش، اثر فیلم‌های نانوکامپوزیت حاوی غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره بر افزایش ماندگاری خاویار فیلماهی و اطمینان از عدم باقی ماندن نانوذرات در محصول نهایی مورد ارزیابی قرار گرفت.

در این پژوهش، نمونه‌های بسته خاویار ۵ گرمی با نانوکامپوزیت‌های دی اکسید تیتانیوم حاوی غلظت‌های مختلف ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۴۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۶۰۰۰ قسمت در میلیون (ppm) نانوذرات نقره به همراه یک گروه کنترل فاقد نانوذرات، مورد بررسی قرار گرفتند. اندازه نانوذرات در تیمارهای اول تا چهارم کمتر از ۵۰ نانومتر و در تیمار پنجم، کمتر از ۱۰ نانومتر بود. نمونه‌های بسته‌بندی‌شده، توسط گروهی از باکتری‌ها و قارچ‌ها، آلوده شدند و پس از گذشت ۲۴ ساعت، آزمایش‌های میکروبیولوژیکی بر روی آن‌ها انجام شد. نتایج آزمون‌های میکروبی و شناسایی باکتری‌های گرم مثبت نشان داد که رشد *Staphylococcus*

Aspergillus ،*Escherichia coli* ،*aureus* *flavus* و *Penicillium* به میزان قابل توجهی کاهش یافته است (P< ۰/۰۵). همچنین، افزایش غلظت نانوذرات نقره (از ppm ۱۰۰۰ تا ppm ۶۰۰۰) به کاهش رشد قارچ‌ها منجر شد، به‌طوری‌که در غلظت ppm ۶۰۰۰ ، رشد قارچ Aspergillus flavus به‌طور کامل متوقف گردید. تصویر (۱) میزان رشد قارچ‌های A. flavus و Penicillium بر روی نمونه‌های بسته بندی شده نانونقره با غلظت‌های مختلف را پس از ۴ روز نشان می‌دهد. مطابق شکل، در غلظت‌های ppm ۱۰۰۰ ، ppm ۲۰۰۰ و ppm ۴۰۰۰ قارچ‌ها در تمام سطح پلیت رشد کرده اند در حالیکه در غلظت ppm ۵۰۰۰ رشد کلونی‌های قارچ در ۸۰ درصد از صفحات نمونه مشاهده شد. در نمونه با پوشش نانو ppm ۶۰۰۰ ، رشد تنها در ۲۰ درصد از صفحات نمونه مشاهده گردید.

شکل ۱. رشد آسپرژیلوس فلاووس و پنی سیلیوم بر روی سطح بسته بندی نانو نقره با غلظت‌های مختلف [۲۵]

نانوذرات نقره به دلیل اندازه کوچک‌تر خود نسبت سطح به حجم بالاتری دارند و تعداد بیشتری از اتم‌های فلزی را در واحد سطح ارائه می‌دهند. این ویژگی باعث می‌شود که تماس بهتری با میکروارگانیسم‌ها برقرار کرده و توانایی آزادسازی یون‌های نقره را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهند. به همین دلیل، نانوذرات نقره در مقایسه با نمک‌های نقره به عنوان عامل ضدمیکروبی کارایی بیشتری دارند. همچنین این نانوذرات خواص منحصر به‌فرد و متنوعی را در برابر سویه‌های مختلف باکتریایی نشان می‌دهند. تحقیقات نشان داده است که سلول‌های باکتریایی با بار منفی، نانوذرات نقره را جذب می‌کنند. به همین دلیل، تفاوت در بار سطحی باکتری‌ها می‌تواند میزان جذب نانوذرات نقره در میان گروه‌های مختلف باکتریایی را تحت تأثیر قرار دهد [۲۶]. در بررسی تأثیر نانوذرات نقره بر باکتری‌ها، اختلاف معناداری در تعداد کلونی‌های *E. coli* و *S. aureus* در غلظت‌های مختلف نانوذرات نقره مشاهده نشد، که نشان می‌دهد نوع باکتری تأثیر قابل توجهی بر تعداد کلونی‌ها ندارد. با این حال، مقایسه غلظت‌های مختلف نشان داد که غلظت ppm ۵۰۰۰ به‌طور معناداری تعداد کلونی‌ها را در مقایسه با غلظت‌های پایین‌تر (ppm ۱۰۰۰ تا ppm ۴۰۰۰) کاهش داده است. بنابراین، افزایش غلظت نانوذرات نقره منجر به کاهش بیشتر

تعداد کلونی‌های باکتری شد. عوامل مختلفی بر ویژگی‌های میکروبیولوژیکی پوشش نانو نقره تأثیر می‌گذارند. این پوشش از آلژینات سدیم به عنوان ماده اصلی و نانوذرات نقره به عنوان ترکیبات ضد میکروبی تشکیل شده است. یکی از روش‌های عملکرد این پوشش، افزایش نفوذپذیری و تخریب لیپوپلی‌ساکارید پلی‌آنیونی (LPS) است که جزء کلیدی دیواره سلولی در باکتری‌های گرم منفی محسوب می‌شود و به عنوان مانعی نفوذناپذیر عمل کرده و از انتقال اکسیژن جلوگیری می‌کند. روش دیگر، تعامل نانو مواد با گروه‌های آنیونی روی سطح سلول است که به دلیل ویژگی پلی‌کاتیونی غشای سلولی، منجر به تشکیل یک لایه نفوذناپذیر در اطراف دیواره سلولی می‌شود. این لایه مانع انتقال حلال‌ها شده و با نفوذ به هسته سلول، روند تولید RNA و پروتئین را متوقف می‌کند. علاوه بر آلژینات سدیم، نانوذرات نقره نیز به عنوان یک ترکیب ضد میکروبی استفاده شده است. محلول نانوذرات نقره دارای ۴۰۰۰ ppm یون نقره بود که در غلظت‌های ۱، ۳ و ۵ درصد به فیلم‌های نازک آلژینات سدیم افزوده شد. نانوذرات نقره به طور مداوم یون‌های نقره را در فیلم منتشر کرده و با تبدیل پیوندهای SH– در دیواره سلولی میکروارگانیسم‌ها به پیوندهای SAg– از طریق واکنش جایگزینی، موجب تخریب این میکروارگانیسم‌ها می‌شود. در نتیجه، می‌توان گفت که این مکانیسم‌ها باعث تخریب میکروبی در محصولات شیلاتی می‌شوند. غلظت باقی‌مانده نقره در تیمارهای پنج و شش بیشتر از تیمارهای یک تا چهار بود، علاوه بر این، به دلیل فرآیند اکسیداسیون ناشی از نفوذ نور، پس از ۶۲ روز بسته‌بندی، رنگ نانوفیلم‌ها در تمامی تیمارها به زرد-قهوه‌ای تغییر یافت، که نشان دهنده کاهش کیفیت است.

اطمینان از عدم باقی ماندن نانوذرات نقره در محصول نهایی از جمله عوامل مهم جهت حفظ ایمنی مصرف کنندگان است. در این پژوهش، میزان نانوذرات نقره آزاد شده در نمونه‌های خاویار نیز به روش تیتراسیون و کاربرد تیترازول با اسید سولفوریک غلیظ اندازه گیری شد. در غلظت‌های مختلف بسته بندی‌های نانوذرات نقره باقیمانده نقره وجود نداشت. همچنین آزمایش نیترینو نیز نشان داد که در محصول نهایی بسته‌بندی‌شده، درصد رهایش نانوذرات صفر بوده که این امر نشان‌دهنده اثربخشی کاربرد نانوذرات نقره برای افزایش ماندگاری محصولات غذایی ارزشمند است [۲۱, ۲۷].

نانوکامپوزیت‌های نقره/مس/دی‌اکسید تیتانیوم

در مطالعه‌ای دیگر، اثر استفاده از نانوذرات نقره (Ag) و مس (Cu) در نانوذرات دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) به عنوان بسته‌بندی بر پاتوژن‌های غذایی و میزان ماندگاری خاویار مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، نانوکامپوزیت $Ag/Cu/TiO_2$ از طریق روش احیای شیمیایی سنتز شدند. نانوذرات نقره با استفاده از نیترات نقره به‌عنوان ماده اولیه، سیترات آمونیوم به‌عنوان عامل پایدارکننده، و هیدرازین هیدرات به‌عنوان عامل احیاکننده سنتز شدند. همچنین، نانوذرات مس از طریق

پنتاهیدرات سولفات مس به‌عنوان ماده اولیه، نشاسته به‌عنوان پلیمر پوشش‌دهنده و اسید اسکوربیک به‌عنوان عامل احیاکننده تهیه شدند. جهت تهیه نانوکامپوزیت‌های TiO_2 بارگذاری‌شده بر روی نانوذرات Ag/Cu، از اکسترودرهای دو مارپیچه استفاده شد.

در این روش، تمام نانوذرات مخلوط شده و سپس با استفاده از روش اختلاط مذاب پوشش‌دهی شدند. این روش یک تکنیک مطلوب برای تهیه نانوذرات/نانوکامپوزیت‌های ساختار پلیمری ترموپلاستیک و الاستومری است که در آن پلیمر مذاب شده و با استفاده از یک اکسترودر در حضور گاز بی اثر با نانوذرات مخلوط می‌شود. بیماری‌های مرتبط با مواد غذایی توسط انواع میکروارگانیسم‌ها شامل باکتری‌ها، ویروس‌ها و انگل‌ها ایجاد می‌شوند. *Escherichia coli* و *Staphylococcus aureus* از باکتری‌های عفونی عامل مسمومیت‌های غذایی هستند. Aspergillus niger به‌عنوان یک پاتوژن با تولید آفلاتوکسین‌ها در مواد غذایی آلوده می‌تواند بیماری ایجاد کند [۲۸]. استفاده از بسته‌بندی مناسب مواد غذایی می‌تواند تا حدودی خطر این بیماری‌های ناشی از عوامل بیماری‌زا را کاهش دهد. طبق نتایج، نانوکامپوزیت Ag/Cu/Tio2 فعالیت ضد میکروبی قابل توجهی را به ترتیب بر *Escherichia coli* < *Staphylococcus aureus* < *Aspergillus* niger نشان داد. این پوشش‌ها در مهار رشد *E. coli* نسبت به *S. aureus* موفق‌تر بود. زیرا *E. coli* یک باکتری گرم منفی است که دارای یک لایه پپتیدوگلیکان نازک به همراه یک غشای لیپیدی خارجی است در حالی که *S. aureus* یک باکتری گرم مثبت است که دارای یک لایه پپتیدوگلیکان ضخیم فاقد لایه لیپیدی خارجی است. بنابراین، عوامل ضد باکتری بر روی باکتری‌های گرم منفی نسبت به گرم مثبت مؤثرتر هستند. نتایج آزمون انتشار آگار نشان داد که هیچ هاله رشدی در اطراف دیسک‌های چهار نمونه نانوکامپوزیت مشاهده نشد، که این امر بیانگر اثر مهاری کامل نانوکامپوزیت‌های سنتز شده $Ag/Cu/TiO_2$ در برابر باکتری‌های مورد آزمایش است. بررسی با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که نانوذرات نقره و مس به‌طور یکنواخت در نانوکامپوزیت TiO_2 توزیع شده‌اند. این توزیع یکنواخت باعث بهبود خواص ضد میکروبی نانوکامپوزیت شده و در عین حال هزینه‌ها را به دلیل کاهش میزان مصرف نقره کاهش می‌دهد. علاوه بر این، کاهش مقدار نقره مصرفی، خطر آزاد شدن یون‌های نقره با ویژگی‌های سمی به داخل مواد غذایی را نیز کاهش می‌دهد. نتایج روش طیف سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) نشان داد که ۰/۱۶۸ppm نقره در روزهای ۳۲ و ۶۲ آزمایش به نمونه‌های خاویار آزاد شد. نانوکامپوزیت حاصل از ترکیب نانوذرات نقره و مس دارای رنگی کم‌تر از نانوکامپوزیت‌های حاوی تنها نانوذرات نقره است که ممکن است ظاهر آن را برای مصرف‌کنندگان کمتر جذاب کند. با این حال به دلیل مزایای قابل توجه

آن نسبت به نانوکامپوزیت‌های متشکل از تنها نانوذرات نقره، گزینه‌ای مناسب برای بازار فعلی محسوب می‌شود. این مزایا شامل اثر ضد میکروبی قوی‌تر است که منجر به افزایش ماندگاری خاویار می‌شود و همچنین کاهش هزینه تولید به دلیل استفاده از مس، که می‌تواند مورد استقبال مصرف‌کنندگان قرار گیرد. تمام یافته‌ها نشان داد که استفاده ترکیبی از نانوذرات $Ag/Cu/TiO_2$ می‌تواند به تمام اهداف مطلوب از جمله افزایش فعالیت ضد میکروبی و کاهش آزادسازی نانوذرات نقره به خاویار، که عمر مفید خاویار را افزایش می دهد و کاهش هزینه‌ها دست یابد [۲۹].

بسته‌بندی نانوکیتوزان حاوی نانوذرات نقره

نانوذرات نقره به دلیل مقاومت حرارتی بالا و تأثیر گسترده بر طیف متنوعی از باکتری‌ها، به‌طور گسترده در بسته‌بندی‌های ضد میکروبی به کار می‌روند. حداکثر میزان مجاز مهاجرت این نانوذرات از بسته بندی به ماده غذایی، برابر با (۰/۰۱ mg/kg) تعیین شده است [۳۰]. مطابق با مقررات کمیسیون (EC) شماره ۲۰۱۴/۱۰، حد مجاز مهاجرت مواد غیرمجاز از یک مانع عملکردی نیز برابر با (۰/۰۱۰ mg/kg) مشخص شده است. همچنین، عواملی مانند اندازه، غلظت، وزن مولکولی نمونه‌های غذایی و توزیع نانوذرات از مهم‌ترین پارامترهای مورد توجه در ارزیابی نرخ مهاجرت در نمونه‌های غذایی هستند [۳۱].

این پژوهش با هدف بررسی اثرات ضد میکروبی پوشش‌های نانوکیتوزان حاوی ۷ درصد نانوذرات نقره در برابر میکروارگانیسم‌های گرم مثبت و گرم منفی بر روی نمونه‌های خاویار تاس‌ماهی ایرانی و همچنین ارزیابی نرخ مهاجرت این نانوذرات به خاویار طی دوره نگهداری انجام شد. در این بررسی، نمونه‌های خاویار با استفاده از استاندارد ۰/۵ مک‌فارلند به باکتری‌های استافیلوکوکوس اورئوس کوآگولاز مثبت و اشریشیا کلی آلوده شدند و علاوه بر آن، با غلظت (10^5CFU/mL) از قارچ فوزاریوم سولانی نیز تلقیح گردیدند. وضعیت میکروبی نمونه‌های پوشش داده شده با نانوذرات نقره و کیتوزان و نمونه شاهد (خاویار پوشش داده شده با فیلم نقره و پلی اتیلن با چگالی پایین)، در روزهای ۱، ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۷۰ مورد ارزیابی قرار گرفت.

طبق نتایج این مطالعه، تعداد کلنی‌ها در نمونه‌های شاهد طی روزهای ۱، ۱۵ و۳۰ به طور قابل‌توجهی افزایش یافت. در مقایسه کلی بین تیمارهای نانوکیتوزان و نانوذرات نقره، اختلاف معناداری، مشاهده نشد. با این حال، در بررسی‌های جزئی‌تر، تفاوت آماری قابل‌توجهی میان اثرات نانوکیتوزان و نانوذرات نقره ثبت گردید. بطور کلی، استفاده ترکیبی از روش‌های استریلیزاسیون، نانوکیتوزان و نانوذرات نقره سبب کاهش بیشتری در تعداد کلنی‌های میکروبی نسبت به نمونه‌های شاهد شد.همچنین تعداد کلونی‌های میکروبی در نمونه‌های شاهد (بدون تیمار) در روزهای ۱، ۱۵، ۳۰

و ۶۰ به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. در مقابل، استفاده از تیمارهای نانویی در تمامی بازه‌های زمانی باعث کاهش تعداد کلونی‌ها شد که عمدتاً ناشی از مرگ باکتری‌ها بود. به‌عنوان مثال، در روزهای ۳۰ و ۶۰، تیمارهای نانویی باعث کاهش بیش از یک لگاریتمی تعداد استافیلوکوکوس اورئوس و اشریشیا کلی در مقایسه با نمونه‌های شاهد شدند. به طور کلی، تفاوت آماری معناداری در تعداد کلونی‌ها بین تیمارهای نانویی در طول روزهای مختلف مشاهده نشد. همچنین، در بازه زمانی بین روزهای ۳۰ و ۶۰، تعداد کلونی‌ها در هر دو گروه شاهد و تیمارهای نانویی کمی افزایش یافت.

با توجه به نبود نگرش مشخص درباره کاربرد نانوذرات نقره و خطرات احتمالی آن‌ها، ارزیابی احتمال آزادسازی نانوذرات نقره از بسته بندی به مواد غذایی ضروری است. برای بررسی احتمال مهاجرت نانوذرات نقره از فیلم نانو نقره ۷ درصد به نمونه‌های خاویار، آنالیزهای طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) و طیف سنجی جذب اتمی (AAS) در روزهای ۳۰ و ۶۰ انجام شد. لازم به ذکر است که بر اساس مطالعات پیشین، ICP-MS دقت بالاتری نسبت به AAS دارد. نتایج نشان داد که اگرچه آزمایش AASهیچ گونه مهاجرتی از بسته‌بندی نانو را نشان نداد، نتایج ICP-MS آزادسازی ۰/۱۶۵ppm نقره به نمونه‌های خاویار را در روزهای ۳۰ و۶۰ آزمایش تایید کرد که از استانداردهای تعیین‌شده برای مواد غذایی پایین‌تر است.

طبق تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی و عبوری (SEM و TEM)، نانوذرات نقره به صورت کروی و اندازه متوسط آنها کمتر از ۱۰۰ نانومتر بود. همچنین، تحلیل‌های میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)اندازه پودر ذرات نقره را حدود ۲۰ نانومتر تخمین زد. بر اساس آنالیزهای پراکنش نور دینامیکی (DLS) و پتانسیل زتا، اندازه متوسط نانوذرات کیتوزان بین ۶۰ تا ۱۰۰ نانومتر تعیین شد که نشان‌دهنده یکنواختی کامل محلول کیتوزان است.

طبق نتایج مطالعه حاضر، کاربرد نانوذرات کوچک به عنوان بسته بندی ضد میکروبی و همچنین نانوکیتوزان می‌تواند بار میکروبی هر دو باکتری و مخمر را در طول زمان نگهداری مشخص به طور قابل توجهی کاهش دهد. به عبارت دیگر، ذرات نقره بار باکتریایی را بیش از یک چرخه لگاریتمی کاهش می دهند. علاوه بر این، نتایج مطالعه نشان داد که بین باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی تفاوت معنی داری وجود ندارد [۲۰].

نتیجه گیری

جلوگیری از فساد و افزایش ماندگاری خاویار برای کشورهای تولیدکننده و صادرکننده این محصول غذایی از اهمیت زیادی برخوردار است. امروزه روش‌های نوین نگهداری جایگزین روش‌های سنتی شده است. برای افزایش ماندگاری و حفظ کیفیت خاویار، استفاده از

نگهدارنده‌های طبیعی و تنظیم عوامل کیفی مطابق با نیاز مشتریان اهمیت دارد. همچنین، بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته مانند نانوفناوری می‌تواند به کاهش مصرف نگهدارنده‌ها در چارچوب محدودیت‌های قانونی، کمک کند. بسته‌بندی مبتنی بر نانوذرات به دلیل قابلیت بالای آن در کاهش میکروارگانیسم‌ها، جلوگیری از اکسیداسیون چربی‌ها و مهار فعالیت آنزیمی، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. نانوذرات به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، خواص ضد میکروبی قابل‌توجهی دارند. در این میان، نانوذرات معدنی مانند نقره، مس و دی‌اکسید تیتانیوم، به دلیل پایداری بیشتر نسبت به نانوذرات آلی، کاربرد گسترده‌تری در بسته‌بندی مواد غذایی پیدا کرده‌اند. همچنین، موادی مانند کیتوزان، لیزوزیم و ناتامایسین که نگهدارنده‌های طبیعی، غیرسمی و تجزیه‌پذیر هستند، در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شوند. این ترکیبات، به‌صورت نانو و غیرنانو، در پوشش‌دهی خاویار نیز به کار گرفته شده‌اند. نتایج این مطالعه مروری نشان داد که پوشش‌های حاوی نگهدارنده‌های طبیعی مانند کیتوزان، ناتامایسین، اسید استیک و لیزوزیم به‌طور چشمگیری ماندگاری خاویار را افزایش داده است و سرعت اکسیداسیون چربی‌ها را کاهش می‌دهند. این مواد تغییری در عطر و طعم خاویار ایجاد نکردند. همچنین، اثر هم‌افزایی ترکیب کیتوزان و ناتامایسین مشاهده شد و مشخص گردید که نگهدارنده‌های طبیعی به شکل ذرات نانو در غلظت‌های پایین، عملکردی مشابه ذرات غیرنانوی این مواد در غلظت‌های بالاتر دارند.

بنابراین فناوری نانو سبب کاهش میزان مصرف نگهدارنده‌ها می‌شود. مطالعات مختلفی به بررسی تأثیر پوشش‌های کیتوزانی به صورت نانو و غیر نانو در ماندگاری مواد غذایی پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، استفاده از نانوذرات کیتوزان و روغن رازیانه عمر مفید ماهی خاویاری را افزایش داده است [۳۲]. همچنین، تحقیقات نشان داد که استفاده از پوشش‌های کیتوزان و عصاره دانه انگور موجب کاهش بار میکروبی در ماهی قزل‌آلا و افزایش ماندگاری آن می‌شود [۱۵]. نانوذرات مختلف (نقره، مس، دی‌اکسید تیتانیوم، و کیتوزان) در بسته‌بندی‌های ضدمیکروبی خاویار سبب کاهش رشد میکروارگانیسم‌های عامل مسمومیت غذایی مانند *Staphylococcus aureus*، *Aspergillus flavus* و *Escherichia coli* شدند و میزان مهاجرت نانوذرات کم و مطابق با استانداردهای ایمنی بوده است. مطالعات مشابه نشان داده‌اند که نانوکامپوزیت‌های شامل ذرات اکسید روی و روغن ریحان موجب افزایش ماندگاری برش‌های ماهی شدند [۳۳]. علاوه بر این، فیلم‌های نانوکامپوزیت ذرات اکسید روی و پلی لاکتیک اسید در بسته‌بندی کتلت ماهی، اثر ضدباکتریایی و ممانعت از تابش فرابنفش را نشان دادند [۳۴]. این نتایج نشان می‌دهند که پوشش‌های مبتنی بر نانوذرات و نگهدارنده‌های طبیعی می‌توانند به‌عنوان یک بسته‌بندی فعال، مؤثر و کارآمد جهت حفظ ماندگاری محصولات غذایی ارزشمندی همچون خاویار استفاده شوند.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله بدین وسیله اعلام می دارند که در ارتباط با انجام، تحلیل، نگارش و انتشار این پژوهش، هیچ گونه تعارض منافع مالی، شخصی، علمی یا سازمانی وجود ندارد.

منابع

[1] Khorram B, Motalebi A, Razavilar V. Use of chitosan to shelf life extension of Siberian sturgeon (Acipenser baeri) caviar. Iran J Fish Sci. 2022;21[3]:726–40. https://doi.org/10.22092/ijfs.2022.349327.0.

[2] Khorram B, Motalebi A, Razavilar V. Evaluation of the effect of chitosan loaded with Natamaycin nanoparticles, lysozyme and acetic acid on shelf life of Siberian sturgeon (Acipenser baeri) caviar. Iran Fish Sci J Res. 2018;27[2]:139–51. https://doi.org/10.22092/isfj.2018.116766. (In Persian)

[3] Dudu A, Georgescu SE. Exploring the multifaceted potential of endangered sturgeon: Caviar, meat and by-product benefits. Animals. 2024;14[16]:2425. https://doi.org/10.3390/ani14162425.

[4] Harris L, Shiraishi H. Understanding the global caviar market: Results of a rapid assessment of trade in sturgeon caviar. TRAFFIC and WWF joint report. 2018;94. Available from: https://www.traffic.org/publications/reports/understanding-the-global-caviar-market/ [Accessed: Jan. 30, 2025]

[5] Alimohammadi S, Mehrdoost Shahrestani K, Yousefi Jourdehi A. Identification and ranking of the harmful factors to the Iranian caviar brand. Iran J Fish Sci Appl. 2024;33(1):99–107. https://doi.org/10.22092/ISFJ.2024.131382. (In Persian)

[6] Abdolhey HA, Karami Rad N. Sturgeon farming development in Iran. SEJ. 2018;1(1):32–44. Available from: https://sej.areeo.ac.ir/article_118732_b264f4b669b84b7cdf4c5da4a091cd10.pdf. (In Persian)

[7] Bronzi P, Rosenthal H. Present and future sturgeon and caviar production and marketing: A global market overview. J Appl Ichthyol. 2014;30(6):1536–46. https://doi.org/10.1111/jai.12628.

[8] Jelodar AS, Safari R. Microbial and chemical quality evaluation of caviar in Iranian processing plants in line with the European Community code. J Appl Ichthyol. 2006;22. https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2007.00996.x.

[9] Mousavian D, Mohammadi Nafchi A, Nouri L, Abedinia A. Physicomechanical properties, release kinetics, and antimicrobial activity of activated low-density polyethylene and orientated polypropylene films by thyme essential oil active component. J Food Meas Charact. 2021;15:883–91. https://doi.org/10.1007/s11694-020-00690-z.

[10] Paidari S, et al. Edible coating and films as promising packaging: a mini review. J Food Meas Charact. 2021;15(5):4205–14. https://doi.org/10.1007/s11694-021-00979-7.

[11] Mol S, Turan S. Comparison of proximate, fatty acid and amino acid compositions of various types of fish roes. Int J Food Prop. 2008;11(3):669–77.

attributes, and morphological analysis of pistachio nut coated with methylcellulose. Food Sci Nutr. 2021;9(5):2576–84. https://doi.org/10.1002/fsn3.2212.

[18] Shao Y, et al. Eugenol-chitosan nanoemulsions by ultrasound-mediated emulsification: Formulation, characterization and antimicrobial activity. Carbohydr Polym. 2018;193:144–52. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.101.

[19] Ghahramani S, Hejazi S, Abdolkhani A. Investigating the application of nano chitosan in the paper and food packaging industry. Packag Sci Art. 2024;15(57):61–8. DOR: 20.1001.1.22286675.1403.15.57.6.5 . (In Persian)

[20] Asl NM, Ahari H, Moghanjoghi AAM, Paidari S. Assessment of nanochitosan packaging containing silver NPs on improving the shelf life of caviar (Acipenser persicus) and evaluation of nanoparticles migration. J Food Meas Charact. 2021;15:5078–86. https://doi.org/10.1007/s11694-021-01082-7.

[21] Anvar AA, et al. Evaluation of the antibacterial effects of Ag-TiO_2 nanoparticles and optimization of its migration to sturgeon caviar (Beluga). Iran J Fish Sci. 2019;18:954–67. https://doi.org/10.22092/ijfs.2019.118074.

[22] Carbone M, Donia DT, Sabbatella G, Antiochia R. Silver nanoparticles in polymeric matrices for fresh food packaging. J King Saud Univ Sci. 2016;28(4):273–9. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2016.05.004.

[23] Amani Y, Mohammadi A, Raofi Rad H. Effect of Cu-nanoparticles https://doi.org/10.1080/10942910701611170.

[12] Salmani A, Safari R, Soltani M, Tavakoli HR. Growth and toxigenesis behavior of Clostridium botulinum type E in Persian sturgeon (Acipenser persicus) caviar prepared with various preservatives. Iran J Vet Med. 2009;3(1). 10.22059/ijvm.2009.19611.

[13] Abdollahzadeh E. Role of lactic acid bacteria in the shelf-life of seafood products. SEJ. 2022;4(7):11–18. Available from: https://sej.areeo.ac.ir/article_126557_a8131ebe3a3453770bbed22edaeebf52.pdf. (In Persian)

[14] Kargar M, Ahari H, Kakoolaki S, Mizani M. Antimicrobial effects of silver/copper/titanium dioxide-nanocomposites synthesised by chemical reduction method to increase the shelf life of caviar (Huso huso). Iran J Fish Sci. 2021;20(1):13–31. https://doi.org/10.22092/ijfs.2021.350974.0.

[15] Hassanzadeh P, Moradi M, Vaezi N, Moosavy MH, Mahmoudi R. Effects of chitosan edible coating containing grape seed extract on the shelf-life of refrigerated rainbow trout fillet. Vet Res Forum. 2018;9(1):73–79. Available from: https://vrf.iranjournals.ir/article_29974_be86e761f842a6f7d55a2eaa32ac13b3.pdf.

[16] Yu D, Regenstein JM, Xia W. Bio-based edible coatings for the preservation of fishery products: A review. Crit Rev Food Sci Nutr. 2019;59(15):2481–93. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1457623.

[17] Moslehi Z, Mohammadi Nafchi A, Moslehi M, Jafarzadeh S. Aflatoxin, microbial contamination, sensory

2021;20(1):13–31.10.22092/ijfs.2021.350974.0.

[30] Hoseinnejad M, Jafari SM, Katouzian I. Inorganic and metal nanoparticles and their antimicrobial activity in food packaging applications. Crit Rev Microbiol. 2018;44(2):161–81. https://doi.org/10.1080/1040841X.2017.1332001.

[31] Honarvar Z, Hadian Z, Mashayekh M. Nanocomposites in food packaging applications and their risk assessment for health. Electron Physician. 2016;8(6):2531. https://doi.org/10.19082/2531.

[32] Maghami M, Motalebi AA, Anvar SAA. Influence of chitosan nanoparticles and fennel essential oils (*Foeniculum vulgare*) on the shelf life of *Huso huso* fish fillets during the storage. Food Sci Nutr. 2019;7(9):3030–41. https://doi.org/10.1002/fsn3.1161.

[33] Arfat YA, Benjakul S, Vongkamjan K, Sumpavapol P, Yarnpakdee S. Shelf-life extension of refrigerated sea bass slices wrapped with fish protein isolate/fish skin gelatin-ZnO nanocomposite film incorporated with basil leaf essential oil. J Food Sci Technol. 2015;52:6182–93. https://doi.org/10.1007/s13197-014-1706-y.

[34] Shankar S, Wang LF, Rhim JW. Incorporation of zinc oxide nanoparticles improved the mechanical, water vapor barrier, UV-light barrier, and antibacterial properties of PLA-based nanocomposite films. Mater Sci Eng C. 2018;93:289–98. https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.08.002.

on anticorrosion performance of polymeric films. Packag Sci Art. 2018;9(34):64–71. DOR: 20.1001.1.22286675.1397.9.34.6.7. (In Persian)

[24] Fallah Delavar M, Sedaghat N. An overview of the functional and antimicrobial properties of chitosan in food preservation. Packag Sci Art. 2020;11(41):16–25. DOR: 20.1001.1.22286675.1399.11.41.2.1. (In Persian)

[25] Anvar A, et al. Evaluation of the antibacterial effects of Ag-TiO_2 nanoparticles and optimization of its migration to sturgeon caviar (Beluga). Iran J Fish Sci. 2019. https://doi.org/10.22092/ijfs.2019.118074.

[26] Gallocchio F, et al. Testing nano-silver food packaging to evaluate silver migration and food spoilage bacteria on chicken meat. Food Addit Contam Part A. 2016;33(6):1063–71. https://doi.org/10.1080/19440049.2016.1179794.

[27] Vernikov V, Gmoshinskiĭ I, Khotimchenko S. Silver nanoparticles in industry, environment and food packaging material: probable risk characterization. Vopr Pitan. 2009;78(6):13–20.

[28] Paterson RRM, Lima N. Filamentous fungal human pathogens from food emphasising *Aspergillus*, *Fusarium* and *Mucor*. Microorganisms. 2017;5(3):44. https://doi.org/10.3390/microorganisms5030044.

[29] Ahari H, Kakoolaki S, Mizani M. Antimicrobial effects of silver/copper/titanium dioxide-nanocomposites synthesised by chemical reduction method to increase the shelf life of caviar (Huso huso). Iran J Fish Sci.

A Comprehensive Review of Novel Nano- and Chitosan-Based Packaging Technologies for Enhancing the Shelf Life of Sturgeon Caviar

Sanaz Alipour Jourshari, Abbas Abedfar*

Department of Food Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Gilan, Rasht, Iran

Abstract

Caviar is one of Iran's strategic and export-oriented aquaculture products. This valuable food is rich in omega-3 fatty acids as well as vitamins A, E, and members of the B group. In the not-so-distant past, the Caspian Sea supplied about 90% of the world's caviar. Today, however, most caviar consumed globally is farmed rather than wild-caught, with China emerging as one of the largest producers. Due to its unique chemical composition—high protein and fat content, the presence of residual tissues, and the absence of proper heat treatment—caviar is highly susceptible to microbial and chemical spoilage. This issue is particularly crucial during export procedures, which are often time-consuming. Conventional preservation methods such as salting and cold-chain storage are insufficient to maintain quality or significantly extend caviar's shelf life. Recent studies have explored modern protective coating techniques, including the application of nanotechnology and natural preservatives such as chitosan, to improve the longevity and quality retention of caviar.

Keyword: Packaging, Caviar, Nanotechnology, Chitosan, Shelf life