مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی_پژوهشی

مروری بر نانوکپسول سازی در صنایع غذایی: فناوری، کاربردها و چالش‌ها

محمدیار حسینی[1*]، محمد کرد[2]

۱. دانشیار گروه صنایع غذایی،دانشکده علوم و فناوری‌های بین رشته‌ای، دانشگاه بناب، بناب، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی بهداشت مواد غذایی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۷

کلمات کلیدی:

نانوکپسول،
نانوذرات،
نانوکپسول سازی،
دسترسی زیستی،
نانوایمنی

DOI: 10.22034/FSCT.22.165.212.

* مسئول مکاتبات:

m.hosseini@ubonab.ac.ir

چکیده

نانوکپسول‌سازی به عنوان یک فناوری نوین در صنایع غذایی، توانایی بالایی در بهبود کیفیت، ایمنی و پایداری محصولات غذایی دارد. این فناوری با محصور کردن ترکیبات زیست‌فعال مانند ویتامین‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها و مواد ضد میکروبی در مقیاس نانو، از تخریب آن‌ها در برابر عوامل محیطی مانند نور، دما و اکسیژن جلوگیری می‌کند و به آزادسازی کنترل‌شده و هدفمند آن‌ها کمک می‌کند. این ویژگی باعث افزایش ماندگاری و اثرگذاری ترکیبات فعال در محصولات غذایی می‌شود. همچنین، نانوکپسول‌ها می‌توانند بهبود تجربه مصرف‌کننده را از طریق آزادسازی تدریجی مواد مغذی و طعم‌دهنده‌ها فراهم کنند. با این حال، استفاده از نانوکپسول‌سازی در صنایع غذایی با چالش‌هایی روبه‌رو است، از جمله هزینه‌های تولید بالا، نگرانی‌های ایمنی مرتبط با نانوذرات و اثرات بلندمدت آن‌ها بر سلامت انسان. مقاله حاضر به بررسی فناوری‌های مختلف نانوکپسول‌سازی، شامل روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی، و کاربردهای آن در بهبود پایداری و کیفیت محصولات غذایی می‌پردازد. علاوه بر این، چالش‌های موجود در این فناوری، از جمله مشکلات زیست‌محیطی و محدودیت‌های اقتصادی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با وجود مزایای فراوان، تحقیقات بیشتری برای ارزیابی ایمنی و تأثیرات نانوذرات در بلندمدت مورد نیاز است تا استفاده از این فناوری به طور ایمن و مؤثر در صنایع غذایی و دارویی گسترش یابد.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-08-07]

[DOI: 10.22034/FSCT.22.165.212]

۱-مقدمه

در سال‌های اخیر، دگرگونی‌های قابل‌توجه در سبک زندگی و الگوهای تغذیه‌ای جوامع، همراه با افزایش آگاهی عمومی نسبت به نقش تغذیه در پیشگیری از بیماری‌ها، موجب افزایش تقاضا برای محصولات غذایی عملکردی و غنی‌شده با ترکیبات زیست‌فعال شده است. ترکیباتی نظیر ویتامین‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها، اسیدهای چرب امگا-۳، پلی‌فنول‌ها، فلاونوئیدها، پپتیدهای زیست‌فعال، پروبیوتیک‌ها و ترکیبات ضدمیکروبی طبیعی، به دلیل نقش‌های بالقوه در پیشگیری و کنترل بیماری‌های غیرواگیر مانند دیابت، بیماری‌های قلبی-عروقی، سرطان و التهاب، در مرکز توجه پژوهش‌های علمی و صنعتی قرار گرفته‌اند[۱-۲-۳-۴-۵].

با این حال، بهره‌برداری مؤثر از این ترکیبات در سیستم‌های غذایی با چالش‌هایی نظیر پایداری پایین در برابر عوامل محیطی (نور، اکسیژن، حرارت، pH)، حلالیت محدود در محیط‌های آبی، تمایل به اکسید شدن و زیست‌دسترسی اندک در دستگاه گوارش مواجه است[۶-۷]. در نتیجه، یافتن راهکارهایی برای حفظ پایداری، کنترل آزادسازی، و افزایش قابلیت جذب این ترکیبات، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر در توسعه محصولات غذایی مدرن به‌شمار می‌رود.

در این راستا، فناوری نانو، و به‌ویژه نانوکپسول‌سازی، به عنوان یک فناوری نوین و چندکارکردی، فرصت‌های نوینی را در ارتقای کیفیت، ایمنی و پایداری مواد غذایی فراهم کرده است[۸]. نانوکپسول‌سازی شامل محصورسازی ترکیبات زیست‌فعال در ساختارهایی با اندازه کمتر از ۱۰۰۰ نانومتر است که معمولاً از یک هسته فعال (ماده مؤثر) و یک پوشش محافظ (نظیر پلیمرهای زیست‌سازگار، لیپیدها یا پروتئین‌ها) تشکیل شده‌اند[۹]. این ساختار می‌تواند از مواد فعال در برابر تخریب محیطی محافظت کرده، امکان رهایش هدفمند یا کنترل‌شده در سیستم گوارشی را فراهم نموده و در نهایت، زیست‌فراهمی آن‌ها را به‌طور مؤثری افزایش دهد[۸].

از مهم‌ترین مزایای نانوکپسول‌سازی می‌توان به آزادسازی تدریجی ترکیبات زیست‌فعال مانند مواد مغذی، طعم‌دهنده‌ها و نگهدارنده‌ها اشاره کرد، که این ویژگی نه تنها موجب افزایش اثربخشی و ماندگاری آن‌ها در محصول نهایی می‌شود، بلکه تجربه حسی مصرف‌کننده را نیز بهبود می‌بخشد[۱۰]. همچنین نانوکپسول‌ها در جلوگیری از واکنش‌های نامطلوبی نظیر اکسیداسیون، حفظ عطر و طعم‌های حساس، و افزایش طول عمر قفسه‌ای محصولات غذایی نقش مهمی ایفا می‌کنند[۱۱].

در کنار این مزایا، کاربرد نانوکپسول‌ها با چالش‌هایی نیز همراه است. پیچیدگی‌های فنی در طراحی فرمولاسیون، هزینه‌های بالای تولید، مقیاس‌پذیری محدود در فرآیندهای صنعتی، نبود چارچوب‌های قانونی مشخص، و نگرانی‌های مربوط به ایمنی و سمیت نانوذرات از جمله موانع موجود در مسیر تجاری‌سازی گسترده این فناوری محسوب می‌شوند[۱۲-۱۳]. بنابراین، ارزیابی دقیق جنبه‌های فناورانه، کاربردی، ایمنی و زیست‌محیطی نانوکپسول‌سازی، نقش تعیین‌کننده‌ای در توسعه پایدار آن در صنایع غذایی ایفا می‌کند.

۲- فناوری و روش های نانوکپسول سازی

۲-۱- فناوری نانوکپسول سازی

نانوکپسول ها سیستم های وزیکولی کوچک و نانویی هستند که در آنها ترکیبات زیست فعال درون یک پوسته محافظ محصور شده اند. این نانوکپسول ها ساختاری هسته-پوسته دارند که هسته آن حاوی ماده فعال است و پوسته آن از موادی مانند پلیمرهای زیست تخریب پذیر، لیپیدها یا پروتئین ها ساخته شده است[۱۴]. کپسول سازی به محافظت از ترکیبات حساس از عوامل محیطی کمک می کند و آزادسازی هدفمند و کنترل شده مواد فعال را تسهیل می کند[۱۵]. ایده اصلی پشت فناوری نانوکپسول، محصور کردن مواد زیست فعال در یک حامل در مقیاس نانو برای بهبود پایداری، فراهمی زیستی و اثربخشی آنها است. عملکرد های پوسته محافظ اطراف هسته شامل محافظت، رهاسازی کنترل شده و تحویل هدفمند میباشد. مواد پوسته از ترکیبات محصور شده در برابر تخریب ناشی از عوامل محیطی مانند نور، گرما، اکسیژن یا

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-08-07]

[DOI: 10.22034/FSCT.22.165.212]

تغییرات pH محافظت می کند[۱۶]. نانوکپسول ها به گونه ای طراحی شده اند که آزادسازی کنترل شده یا پایدار مواد فعال را ارائه دهند. نرخ رهاسازی را می توان بر اساس ترکیب پوسته و شرایط محیطی تنظیم کرد که در کاربردهای غذایی برای حفظ تازگی و قدرت در طول زمان بسیار مهم است[۱۷]. در برخی موارد، نانوکپسول ها به گونه ای مهندسی می شوند که محتویات خود را در یک مکان خاص یا تحت شرایط خاص آزاد کنند و کارایی ترکیبات زیست فعال را بهبود بخشند و جذب آنها را در بدن انسان افزایش دهند[۱۸].

۲-۲- روش‌های فیزیکی

در ساخت نانوکپسول ها از روش های متنوعی مانند فیزیکی، شیمیایی و زیستی استفاده می شود که هرکدام مزایا و معایبی دارند. روش های فیزیکی شامل هموژناسیون با فشار بالا، خشک کردن پاششی و روش های الترا سونیک میباشد. در روش هموژناسیون با فشار بالا، یک مخلوط از ترکیبات زیست‌فعال و پلیمر در شرایط فشار بالا هموژنه می‌شود. این فرآیند باعث شکستن قطرات بزرگ به ذرات نانو می‌شود و به تولید نانوکپسول‌هایی با اندازه یکنواخت کمک می‌کند. این روش به‌ویژه برای نانوکپسول سازی ترکیبات هیدروفوبیک مؤثر است و می‌تواند پایداری نانوکپسول‌ها را افزایش دهد[۱۹]. خشک کردن پاششی نیز یکی از متداول‌ترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین روش‌ها برای تولید نانوکپسول‌ها است. در این فرآیند، مخلوط مایع حاوی ترکیب فعال به یک پاشنده تبدیل می‌شود و به صورت قطرات ریز به داخل یک محفظه گرم پاشیده می‌شود. با تبخیر سریع حلال، نانوکپسول‌ها تشکیل می‌شوند. این روش قابلیت تولید انبوه نانوکپسول‌ها را دارد و می‌تواند به‌طور مؤثری ترکیبات زیست‌فعال را کپسول کند[۲۰]. در روش های التراسونیک از امواج فراصوت برای تولید نانوکپسول‌ها استفاده می‌شود. امواج التراسونیک می‌توانند به ایجاد شوک‌های مافوق صوت کمک کنند که منجر به اختلاط و هموژناسیون بهتر مواد می‌شود. این روش به‌ویژه برای نانوکپسول سازی مواد حساس به حرارت مناسب است و می‌تواند به بهبود قابلیت انحلال و دسترسی زیستی ترکیبات کمک کند[۲۱]. این روش‌ها به دلیل قابلیت تولید نانوکپسول‌های با اندازه و ویژگی‌های مشخص و همچنین امکان بهینه‌سازی برای کاربردهای مختلف در صنایع غذایی، به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۳- روش های شیمیایی

روش‌های شیمیایی برای تولید نانوکپسول‌ها به دلیل قابلیت کنترل دقیق بر ویژگی‌های نانوکپسول و انتخاب مواد اولیه مناسب، اهمیت ویژه‌ای دارند. روش های شیمیایی شامل پلیمریزاسیون درجا و تشکیل نانوذرات با استفاده از مواد زیست پذیر هستند. روش پلیمریزاسیون درجا شامل انجام پلیمریزاسیون در داخل یک امولسیون یا محلول است که منجر به تشکیل نانوکپسول‌ها می‌شود. در این فرآیند، مونومرها تحت تأثیر شرایط خاص (مانند دما و زمان) به پلیمرهایی تبدیل می‌شوند که هسته نانوکپسول را تشکیل می‌دهند. نانوکپسول‌ها به‌دلیل ساختار ویژه خود، قابلیت آزادسازی کنترل‌شده ترکیبات زیست‌فعال را دارند و می‌توانند به‌طور مؤثری پایداری مواد غذایی را افزایش دهند[۲۲]. همچنین تشکیل نانوذرات با استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر نیز انجام میشود؛ در این روش، از مواد طبیعی و زیست‌سازگار (مانند پلیمرهای طبیعی) برای تولید نانوذرات استفاده می‌شود. این نانوذرات معمولاً به‌دلیل خصوصیات زیست‌سازگاری و عدم سمیت، گزینه‌های مناسبی برای کاربردهای غذایی و دارویی هستند. این فرآیند می‌تواند شامل روش‌های مختلفی نظیر رسوب‌دهی یا استخراج باشد[۲۳]. این روش‌ها نه تنها بر پایداری ترکیبات تأثیر می‌گذارند، بلکه می‌توانند به افزایش کارایی و دسترسی زیستی ترکیبات غذایی نیز کمک کنند.

۲-٤- روش های زیستی

روش‌های زیستی برای تولید نانوکپسول‌ها به‌دلیل استفاده از مواد طبیعی و پایدار، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند که شامل استخراج و استفاده از منابع طبیعی برای ایجاد نانوکپسول‌های زیست‌سازگار هستند. روش های زیستی شامل استفاده از پلیمرهای طبیعی و تکنیک‌های میکروبی میباشند. در روش استفاده از پلیمر های طبیعی، از پلیمرهای طبیعی مانند کیتوزان، ژلاتین و پکتین برای تولید نانوکپسول‌ها استفاده می‌شود. این پلیمرها به‌دلیل خواص زیست‌سازگاری و قابلیت حلالیت در

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-08-07]

[DOI: 10.22034/FSCT.22.165.212]

آب، گزینه‌های مناسبی برای کپسول‌سازی ترکیبات غذایی و دارویی هستند. این نانوکپسول‌ها معمولاً به‌دلیل ویژگی‌های خاص خود مانند آزادسازی کنترل‌شده و پایداری بالا، در صنایع غذایی و دارویی کاربرد دارند[۲۴]. علاوه بر آن، در روش تکنیک های میکروبی، از میکروارگانیسم‌ها (مانند باکتری‌ها و مخمرها) برای تولید نانوکپسول‌ها استفاده می‌شود. میکروارگانیسم‌ها می‌توانند به‌عنوان عامل تولید کننده پلیمرهای زیستی عمل کنند که سپس برای کپسول‌سازی ترکیبات زیست‌فعال به کار می‌روند. این روش می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید و افزایش پایداری نانوکپسول‌ها منجر شود[۲۵]. روش‌های زیستی تولید نانوکپسول‌ها با استفاده از پلیمرهای طبیعی و تکنیک‌های میکروبی به‌دلیل قابلیت‌های زیست‌سازگاری و پایداری، به‌طور فزاینده‌ای در صنایع غذایی و دارویی محبوبیت یافته‌اند. این روش‌ها نه تنها به کاهش اثرات منفی محیطی کمک می‌کنند، بلکه می‌توانند کیفیت و کارایی محصولات نهایی را نیز بهبود بخشند.

۲-۵- مواد مورد استفاده در نانوکپسول سازی

در فرایند های نانوکپسول سازی به‌طور عمده از مواد مختلفی برای ایجاد ساختارهای نانو استفاده می‌شود که شامل پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر و لیپیدها هستند. پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر به‌دلیل قابلیت تخریب بیولوژیکی و سازگاری با محیط زیست، به‌طور گسترده‌ای‌در نانوکپسول‌سازی مورد استفاده‌قرار می‌گیرند. پلیمرهایی‌مانندپلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) و پلی‌هیدروکسی‌الکانوآت (PHA) می‌توانند به‌عنوان ماتریکس‌های کپسول سازی عمل کنند که ترکیبات زیست‌فعال را در برابر تخریب محیطی محافظت می‌کنند. این پلیمرها می‌توانند آزادسازی کنترل‌شده مواد مغذی را تسهیل کنند و به حفظ کیفیت و پایداری محصولات غذایی کمک نمایند[۲۶]. لیپیدها نیز به‌عنوان مواد کپسول‌کننده در نانوکپسول‌سازی کاربرد دارند. آنها می‌توانند به‌عنوان یک ماتریکس برای کپسول سازی ترکیبات هیدروفوبیک مانند ویتامین‌ها و آنتی‌اکسیدان‌ها عمل کنند. این مواد به‌دلیل ویژگی‌های خاص خود، مانند قابلیت تشکیل میسل و لایه‌های دوگانه، می‌توانند به پایداری نانوکپسول‌ها کمک کنند. همچنین، مواد طبیعی مانند نشاسته و پروتئین‌ها نیز می‌توانند به‌عنوان حامل‌های زیست‌سازگار در فرآیند نانوکپسول‌سازی استفاده شوند[۲۷]. این مواد نه تنها به بهبود کیفیت و پایداری محصولات غذایی کمک می‌کنند، بلکه از نظر زیست‌محیطی نیز مناسب‌تر هستند.

۳- کاربردها و مزایای نانوکپسول ها در صنایع غذایی

نانوکپسول‌سازی در صنایع غذایی نقش مهمی در محافظت و بهبود پایداری ترکیبات زیست‌فعال ایفا می‌کند و به روش‌های مختلفی به حفظ ارزش غذایی محصولات کمک می‌کند.

۳-۱- بهبود پایداری و حفاظت از ترکیبات حساس

بسیاری از ترکیبات زیست‌فعال مانند ویتامین‌های A ، D، Eو K و آنتی‌اکسیدان‌هایی مثل پلی‌فنول‌ها و فلاونوئیدها در برابر تخریب توسط عوامل محیطی آسیب‌پذیر هستند. نانوکپسول کردن این ترکیبات در ذرات محافظتی مانند لیپوزوم‌ها یا نانوژل‌ها، پایداری شیمیایی آن‌ها را افزایش می‌دهد و به کاهش واکنش‌های ناخواسته کمک می‌کند[۲۸-۲۹].

۳-۲- انتشار کنترل‌شده و هدفمند

فناوری نانو می‌تواند آزادسازی تدریجی ترکیبات زیست‌فعال را در محل‌های مشخص در دستگاه گوارش امکان‌پذیر کند. این ویژگی به‌خصوص در بهبود کارایی مکمل‌های غذایی و محصولات دارویی- غذایی بسیار مهم است، چرا که اجازه می‌دهد مواد مغذی در زمان و مکان مناسب جذب شوند و اثر بهتری داشته باشند[۳۰]. همچنین این فناوری با انتشار کنترل‌شده عوامل ضد میکروبی، به جلوگیری از رشد عوامل بیماری‌زا و کاهش فساد مواد غذایی کمک می‌کند. برای مثال، نانوکپسول می‌تواند ترکیبات ضد میکروبی مانند اسانس‌ها و نانوذرات فلزی را به‌گونه‌ای کنترل کند که این ترکیبات به‌تدریج آزاد شوند و در طول زمان تأثیر محافظتی خود را حفظ کنند[۲۸-۲۹].ترکیبات ضد میکروبی محصور شده در نانوذرات باعث می‌شوند که این عوامل به‌صورت هدفمند و مؤثر به میکروارگانیسم‌های مضر حمله کنند، بدون اینکه خواص حسی و تغذیه‌ای محصول غذایی تغییر کند. این ویژگی به‌ویژه در محصولات تازه، لبنیات، گوشت، و غذاهای

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-08-07]

[DOI: 10.22034/FSCT.22.165.212]

بسته‌بندی‌شده برای جلوگیری از آلودگی و افزایش زمان نگهداری مفید است[۳۱]. به عنوان مثال، تبدیل عصاره گیاه هوفاریقون[1] به نانوکپسول، با آزادسازی تدریجی ترکیبات، اثر ضد میکروبی را افزایش داده و می‌تواند به افزایش ماندگاری پنیر و سایر محصولات غذایی کمک کند[۳۲].

۳-۳- افزایش دسترسی زیستی

دسترسی زیستی[2] ترکیبات فعال، به معنای میزان و سرعت جذب آن‌ها در بدن، یکی از چالش‌های بزرگ در توسعه محصولات غذایی مغذی است. نانوکپسول با افزایش قابلیت انحلال و فراهمی زیستی این مواد، جذب و اثربخشی آن‌ها را بهبود می‌بخشد. به‌عنوان مثال، ترکیبات آب‌گریزی مثل کاروتنوئیدها و کورکومین می‌توانند از طریق این فناوری به شکل‌های بهتر قابل جذب تبدیل شوند[۳۳].

۳-٤- کاربرد در محصولات لبنی و نوشیدنی‌ها

در محصولات لبنی و نوشیدنی‌ها، استفاده از نانوکپسول برای افزودن ترکیبات فعال مانند پروبیوتیک‌ها، بدون ایجاد تغییرات نامطلوب در طعم و بافت، بسیار کاربرد دارد. این کار به تولید نوشیدنی‌های غنی‌شده با مواد مغذی و با ماندگاری طولانی‌تر کمک می‌کند. طبق پژوهش انجام شده توسط امتیازجو و همکاران، نشان داده شد که شیر غنی‌شده با نانو کپسول ها تفاوت معناداری با شیر شاهد نداشته و این یعنی نانوحامل‌ها می‌توانند به طور مؤثری در غنی‌سازی شیر استفاده شوند بدون اینکه بر ویژگی‌های حسی آن تأثیر منفی بگذارند[۳٤].

۳-۵- افزایش ماندگاری و ایمنی مواد غذایی

نانوکپسول‌سازی با استفاده از ذرات نانو، ترکیبات ضد میکروبی را به‌آرامی و در مکان‌های موردنیاز آزاد می‌کند. این روش به حفظ تازگی و جلوگیری از فساد مواد غذایی منجر می‌شود و اثر ضد میکروبی طولانی‌مدت‌تری ارائه می‌دهد[۳۵]. از جمله مثال‌های بارز در این زمینه می‌توان به استفاده از نانوذرات نقره و نانوکپسول‌های حاوی روغن‌های ضروری مانند روغن آویشن و رزماری اشاره کرد که توانایی ضد باکتریایی آن‌ها به‌خوبی در بسته‌بندی مواد غذایی برای جلوگیری از رشد میکروب‌ها به‌کار گرفته می‌شود. این فناوری به حفظ ایمنی مواد غذایی، حتی در دماهای نگهداری پایین، کمک کرده و ماندگاری محصولات را افزایش می‌دهد[۳٦]. سید حاجی زاده و همکاران نشان دادند که استفاده از نانوکپسول‌های اسانس رزماری می‌تواند به طور مؤثری به افزایش ماندگاری میوه‌های فسادپذیر مانند زردآلو کمک کند[۳۷].

این فناوری هنوز با چالش‌هایی مانند ایمنی نانوذرات و تأثیرات زیست‌محیطی آن‌ها مواجه است، که نیازمند تحقیقات بیشتری است تا از بی‌خطری استفاده از نانوکپسول‌ها در طولانی‌مدت اطمینان حاصل شود.

۳-٦- حفظ و تقویت طعم و عطر

نانوکپسول کردن، ترکیبات معطر و طعم‌دهنده را درون ساختارهایی با ابعاد نانومتری محصور می‌کند که از تماس مستقیم آن‌ها با عوامل محیطی جلوگیری می‌کند و احتمال تخریب و اکسیداسیون آن‌ها را کاهش می‌دهد. از دیگر مزایای این روش، افزایش حلالیت ترکیبات معطر در محیط‌های آبی است که باعث رهایش تدریجی آن‌ها در طول زمان می‌شود و طعم و عطر پایدارتر و دلپذیرتری ایجاد می‌کند. برخی از تحقیقات نشان داده‌اند که نانوکپسول باعث افزایش زیست‌فراهمی و ماندگاری ترکیبات معطر در سیستم‌های غذایی می‌شود و مصرف‌کنندگان را با تجربه‌ای لذت‌بخش‌تر از محصول مواجه می‌سازد[۳۸]. این فناوری به‌ویژه برای محافظت از ترکیبات طبیعی و حساس مانند اسانس‌ها و عطرهای گیاهی کاربرد دارد که در حالت عادی به سرعت تخریب می‌شوند. با استفاده از نانوکپسول‌ها، این ترکیبات می‌توانند به تدریج و به صورت کنترل‌شده آزاد شوند و بدین ترتیب عطر و طعم ماندگاری در طول مدت مصرف ایجاد شود[۳۹].

1- *Hypericum perforatum*

2-Bioavailability

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-08-07]

[DOI: 10.22034/FSCT.22.165.212]

۳-۷- تقویت ویژگی‌های تغذیه‌ای

این فناوری می‌تواند به ارائه ریزمغذی‌ها، ویتامین‌ها، مواد معدنی، و ترکیبات پروبیوتیک به شیوه‌ای مؤثرتر و با پایداری بالاتر کمک کند. ریزمغذی‌ها و پروبیوتیک‌ها معمولاً در برابر شرایط نامساعد محیطی مانند دما، pH، و نور حساس هستند و به‌راحتی تخریب می‌شوند یا فعالیت زیستی خود را از دست می‌دهند. نانوکپسول کردن، این ترکیبات را در پوشش‌های نانوذرات محافظ محصور می‌کند و از تخریب آن‌ها جلوگیری می‌کند، در عین حال که فراهمی زیستی آن‌ها را افزایش می‌دهد. این فناوری نوین به تولید مکمل‌های غذایی با کارایی بالا منجر شده است و راهکاری برای مقابله با کمبود ریزمغذی‌ها و ارتقای سلامت عمومی جامعه فراهم می‌آورد. به‌عنوان مثال، محصور کردن ویتامین D در نانوکپسول‌ها باعث افزایش جذب و پایداری آن در بدن می‌شود و تأثیرات مثبتی بر سلامت استخوان‌ها و سیستم ایمنی دارد[۴۰]. علیزاده و همکاران نشان دادند که نانو کپسول بر پایه هیدرولیزات زئین می‌تواند به‌طور موفقیت‌آمیزی به عنوان یک سیستم نانو برای غنی‌سازی آب پرتقال با ویتامین D3 استفاده شود[۴۱].

۳-۸- کاهش نیاز به نگهدارنده‌های مصنوعی

نگهدارنده‌های مصنوعی به‌طور معمول برای جلوگیری از فساد و افزایش ماندگاری مواد غذایی استفاده می‌شوند، اما مصرف بلندمدت این مواد می‌تواند تأثیرات منفی بر سلامت مصرف‌کنندگان داشته باشد. صنعت نانوکپسول سازی با ارائه یک راه‌حل طبیعی و کارآمد برای حفظ کیفیت و ایمنی مواد غذایی، می‌تواند نیاز به استفاده از نگهدارنده‌های مصنوعی را کاهش دهد و در عین حال تأثیرات منفی ناشی از آن‌ها را از بین ببرد[۴۲]. طبق پژوهش انجام شده توسط یگانه و ریحانی‌پول، مشخص شد که نانوکپسول‌های حامل آستاگزانتین[3] که با ترکیب مالتودکسترین و کازئینات سدیم پوشش داده شده‌اند، پتانسیل بالایی برای جایگزینی بخشی از نیتریت سدیم در فرمولاسیون سوسیس و احتمالاً سایر محصولات گوشتی دارند[۴۳].

۴- چالش ها و محدودیت ها

۴-۱- ایمنی و نگرانی‌های سلامتی

نانوکپسول‌سازی و استفاده از نانوذرات در صنایع غذایی به دلیل مزایای فراوان خود در بهبود کیفیت مواد غذایی، افزایش ماندگاری و بهره‌وری مواد مغذی، توجه زیادی را جلب کرده است. با این حال، استفاده از نانوذرات در غذاها نیز نگرانی‌هایی در خصوص ایمنی و تأثیرات بالقوه آن‌ها بر سلامت انسان به وجود آورده است. نانوذرات به دلیل ابعاد نانومتری خود می‌توانند به راحتی از سدهای بیولوژیکی عبور کنند و در اندام‌های مختلف بدن تجمع یابند، که این مسئله می‌تواند خطرات و اثرات منفی ناخواسته‌ای به دنبال داشته باشد[۴۴].

۴-۲- اثرات بالقوه نانوذرات بر سلامت انسان

۴-۲-۱- تجمع و سمیت نانوذرات

یکی از نگرانی‌های اصلی در مورد استفاده از نانوذرات در صنایع غذایی، توانایی آن‌ها در تجمع در بافت‌های بدن است. نانوذرات به دلیل اندازه کوچک و سطح ویژه زیاد خود قادر به عبور از سدهای فیزیولوژیکی مانند پوست، دستگاه گوارش و حتی سد خونی–مغزی هستند. برخی از مطالعات نشان داده‌اند که نانوذرات ممکن است در سلول‌ها و بافت‌های مختلف بدن تجمع کرده و باعث التهاب، استرس اکسیداتیو و حتی آسیب به DNA شوند، که می‌تواند به بروز بیماری‌های مزمن مانند سرطان منجر شود[۴۵].

۴-۲-۲- سمیت نانوذرات در دستگاه گوارش

نانوذرات به‌ویژه در معرض سیستم گوارشی قرار دارند و ممکن است باعث مشکلاتی در جذب مواد مغذی شوند. برخی از تحقیقات نشان می‌دهند که نانوذرات می‌توانند باعث آسیب به مخاط گوارشی شوند و اثرات منفی بر سیستم ایمنی بدن داشته باشند. همچنین، تماس مستقیم نانوذرات با سلول‌های روده می‌تواند منجر به بروز واکنش‌های آلرژیک و التهابی گردد[۴۶].

3-Astaxanthin

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-08-07]

[DOI: 10.22034/FSCT.22.165.212]

٤-٢-٣- آسیب به سلول‌ها و سیستم‌های بیولوژیکی

نانوذرات می‌توانند به‌راحتی در سطح سلولی تعامل کنند و باعث تغییراتی در متابولیسم سلولی و تولید رادیکال‌های آزاد شوند. این امر می‌تواند به آسیب اکسیداتیو و التهاب منجر شود، که در درازمدت می‌تواند بر سلامت انسان اثرات منفی داشته باشد. برخی از نانوذرات مانند نانوذرات سیلیکا و نانوذرات نقره نشان داده‌اند که می‌توانند به سلول‌ها آسیب برسانند و منجر به مرگ سلولی شوند[٤٧].

٤-٢-٤- واکنش‌های ایمنی و آلرژیک

تماس با نانوذرات ممکن است واکنش‌های ایمنی بدن را تحریک کند و باعث بروز آلرژی یا حساسیت شود. نانوذرات به دلیل اندازه و سطح ویژه خود، ممکن است به‌طور متفاوتی نسبت به ذرات بزرگ‌تر با سیستم ایمنی تعامل کنند و این تعاملات می‌تواند موجب تولید واکنش‌های آلرژیک و التهابی شود[٤٨].

با وجود پتانسیل‌های فراوان نانوکپسول‌سازی در صنایع غذایی، هنوز هم نیاز به تحقیقات بیشتر برای ارزیابی دقیق‌تر ایمنی و اثرات بالقوه آن‌ها بر سلامت انسان وجود دارد. لازم است که این تحقیقات شامل ارزیابی دقیق و طولانی‌مدت از سمیت، تجمع و اثرات جانبی نانوذرات در بدن انسان باشد تا بتوان اطمینان حاصل کرد که استفاده از این فناوری برای مصرف‌کنندگان ایمن است.

٤-٣- محدودیت‌های هزینه و تولید انبوه

نانوکپسول‌سازی به عنوان یک فناوری نوین با پتانسیل‌های فراوان در صنایع غذایی، دارویی و شیمیایی مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در این زمینه، محدودیت‌های هزینه و مقیاس‌پذیری است. تولید انبوه نانوکپسول‌ها می‌تواند با مشکلات قابل توجهی روبه‌رو شود که نیازمند حل و فصل‌های کارآمد و بهینه است تا این فناوری بتواند به‌طور گسترده در بازارهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد. یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در تولید نانوکپسول‌ها، هزینه‌های بالای مواد اولیه و فرآیندهای تولید است. برای ساخت نانوکپسول‌ها به مواد اولیه خاصی نظیر پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر، لیپیدها و ترکیبات فعال نیاز است که هزینه‌های بالایی دارند. علاوه بر این، بسیاری از فرآیندهای تولید نانوکپسول‌ها، مانند امولسیون‌سازی یا رسوب‌دهی، نیاز به تجهیزات تخصصی و فرآیندهای پیچیده دارند که باعث افزایش هزینه‌های تولید می‌شود [٤٩-٥٠].

٤-٤- اثرات زیست‌محیطی

استفاده از نانوکپسول‌ها در صنایع مختلف، به‌ویژه در صنایع غذایی و دارویی، مزایای زیادی دارد، اما نگرانی‌هایی نیز در مورد تأثیرات زیست‌محیطی آن‌ها وجود دارد. از آنجایی که نانوذرات به دلیل ابعاد میکروسکوپی خود می‌توانند در محیط زیست پراکنده شوند، بررسی اثرات آن‌ها بر اکوسیستم و سلامت محیط زیست ضروری است. علاوه بر این، برای کاهش اثرات منفی این فناوری، استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر در تولید نانوکپسول‌ها در دستور کار قرار گرفته است[٥١].

٤-٤-١- انتقال و انباشته شدن نانوذرات در محیط زیست

چالش‌های انتقال و انباشته شدن نانوذرات در محیط زیست با افزایش تولید و کاربرد آن‌ها، به مسائل مهمی در تحقیقات زیست‌محیطی تبدیل شده است. نانوذرات می‌توانند توسط میکروارگانیسم‌های خاک و آب جذب شده و از طریق زنجیره غذایی به سطوح بالاتر انتقال یابند. این انتقال می‌تواند به زیست‌تجمع[4] و زیست‌افزایش[5] منجر شود که اثرات سمی بر گونه‌های بالاتر مانند ماهی‌ها، پرندگان، و در نهایت انسان‌ها ایجاد می‌کند[٥٢]. همچنین به دلیل پایداری و اندازه کوچک می‌توانند در محیط زیست به مدت طولانی باقی بمانند و به‌طور گسترده‌ای منتشر شوند. این ویژگی‌ها می‌تواند منجر به تغییرات غیرقابل پیش‌بینی در رفتار و واکنش‌های شیمیایی نانوذرات در محیط شود و اثرات زیستی و اکوسیستمی ناشناخته‌ای ایجاد کند[٥٣].

٤-٤-٢- سمیت زیستی نانوذرات

4-Bioaccumulation

5- Biomagnification

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-08-07]

[DOI: 10.22034/FSCT.22.165.212]

سمیت زیستی نانوذرات یکی از موضوعات کلیدی در پژوهش‌های مرتبط با استفاده از نانوکپسول در صنایع غذایی است. تحقیقات نشان داده است که برخی از نانوذرات می‌توانند اثرات منفی بر سلول‌ها و بافت‌های بدن داشته باشند و پتانسیل ایجاد سمیت و آسیب‌های زیستی را در شرایط خاص دارا هستند. به عنوان مثال، نانوذرات فلزی مانند نقره و دی‌اکسید تیتانیوم با ورود به سلول‌ها، احتمال تولید گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن[6] و ایجاد استرس اکسیداتیو را افزایش می‌دهند که می‌تواند به آسیب سلولی منجر شود[۵۴]. مطالعاتی نیز نشان داده‌اند که برخی از نانوذرات ممکن است از سدهای زیستی مهم مانند سد خونی–مغزی عبور کنند و اثرات بالقوه‌ای بر روی سیستم عصبی ایجاد کنند. به علاوه، در دستگاه گوارش نیز نانوذرات می‌توانند بر میکروبیوم روده تاثیر گذاشته و تعادل طبیعی آن را مختل کنند، که این مسئله ممکن است موجب بروز بیماری‌های مرتبط با سیستم گوارشی شود[۵۵]. با این حال، ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی نانوذرات، از جمله اندازه، شکل، و ترکیب سطحی، بر میزان سمیت آن‌ها تأثیر دارد و نشان می‌دهد که بسته به نوع نانوذره، درجه و نوع اثرات سمی می‌تواند متفاوت باشد. از این رو، بررسی دقیق سمیت زیستی هر نوع نانوذره پیش از استفاده در صنایع غذایی ضروری است[۵۶].

٤-٤-۳- تأثیرات بر میکروارگانیسم‌های خاک و آب

نانوذرات می‌توانند بر فعالیت‌های میکروبی در خاک و آب تأثیر بگذارند. این تأثیرات می‌توانند موجب تغییرات در فرایندهای بیولوژیکی نظیر تجزیه مواد آلی و چرخه‌های نیتروژن و کربن شوند. به‌ویژه، برخی از نانوذرات ممکن است به‌طور مستقیم به میکروارگانیسم‌ها آسیب برسانند یا باعث تغییرات در ساختار میکروبی جامعه شوند[۵۷].

اگرچه نانوکپسول‌ها مزایای زیادی برای صنایع غذایی و دارویی دارند، اما اثرات زیست‌محیطی و سمیت زیستی آن‌ها همچنان نگرانی‌هایی جدی محسوب می‌شود. به دلیل پایداری و ابعاد کوچک، نانوذرات می‌توانند در محیط باقی بمانند، به زنجیره‌های غذایی وارد شده و در سطوح مختلف آن تجمع یابند که این می‌تواند به بروز آثار سمی برای اکوسیستم و موجودات منجر شود. اثرات منفی بر میکروارگانیسم‌های خاک و آب، و احتمال اختلال در فرآیندهای زیستی خاک و آب، همگی نیازمند مدیریت دقیق و تحقیقات بیشتر هستند. در نهایت، استفاده از نانوکپسول‌های زیست‌تخریب‌پذیر و انجام ارزیابی‌های جامع برای کاهش پیامدهای زیست‌محیطی این فناوری اهمیت بالایی دارد.

۵- نتیجه گیری

فناوری نانوکپسول‌سازی به عنوان یکی از نوآورانه‌ترین رویکردها در صنایع غذایی، نقش بی‌بدیلی در بهبود کیفیت، ماندگاری و ایمنی محصولات غذایی ایفا می‌کند. این فناوری با بهره‌گیری از ساختارهای نانومتری، امکان کپسول کردن ترکیبات زیست‌فعال، حفاظت از آنها در برابر عوامل محیطی و آزادسازی کنترل‌شده در زمان و مکان مشخص را فراهم می‌آورد. نتایج بررسی‌های ارائه شده در این مقاله نشان می‌دهند که نانوکپسول‌ها می‌توانند مزایای متعددی نظیر افزایش فراهمی زیستی، تقویت ویژگی‌های تغذیه‌ای، حفاظت از طعم و عطر، و کاهش استفاده از نگهدارنده‌های مصنوعی را به همراه داشته باشند. با این حال، چالش‌هایی مانند هزینه‌های تولید، پیچیدگی در مقیاس‌پذیری و نگرانی‌های مرتبط با ایمنی نانوذرات بر سلامت انسان و محیط زیست، موانع مهمی بر سر راه توسعه و پذیرش گسترده این فناوری به شمار می‌روند. برای رفع این چالش‌ها، انجام تحقیقات جامع‌تر درباره سمیت نانوذرات، بهبود مواد مورد استفاده برای نانوکپسول‌سازی و توسعه روش‌های پایدار و مقرون‌به‌صرفه ضروری است. در مجموع، نانوکپسول‌سازی پتانسیل قابل توجهی برای تغییر مسیر صنایع غذایی به سمت تولید محصولات با کیفیت‌تر و پایدارتر دارد، اما تحقق این هدف مستلزم همکاری میان رشته‌ای، سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه، و تدوین سیاست‌های ایمنی و استانداردهای دقیق است. دستیابی به این اهداف می‌تواند راه را برای بهره‌گیری کامل از قابلیت‌های این فناوری نوین هموار کند.

6-ROS

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-08-07]

[DOI: 10.22034/FSCT.22.165.212]

۵-منابع

[1] Shah, A. K., & Dhalla, N. S. (2021). Effectiveness of some vitamins in the prevention of cardiovascular disease: a narrative review. Frontiers in Physiology, 12, 729255.

[2] Sherratt, S. C., Libby, P., Budoff, M. J., Bhatt, D. L., & Mason, R. P. (2023). Role of omega-3 fatty acids in cardiovascular disease: the debate continues. Current atherosclerosis reports, 25(1), 1-17.

[3] Montenegro-Landívar, M. F., Tapia-Quirós, P., Vecino, X., Reig, M., Valderrama, C., Granados, M., ... & Saurina, J. (2021). Polyphenols and their potential role to fight viral diseases: An overview. Science of the Total Environment, 801, 149719.

[4] Li, Meng, et al. "Evidence of flavonoids on disease prevention." Antioxidants 12.2 (2023): 527.

[5] Udenigwe, C. C., Abioye, R. O., Okagu, I. U., & Obeme-Nmom, J. I. (2021). Bioaccessibility of bioactive peptides: Recent advances and perspectives. Current opinion in food science, 39, 182-189.

[6] Enaru, B., Drețcanu, G., Pop, T. D., Stănilă, A., & Diaconeasa, Z. (2021). Anthocyanins: Factors affecting their stability and degradation. Antioxidants, 10(12), 1967.

[7] Cao, H., Saroglu, O., Karadag, A., Diaconeasa, Z., Zoccatelli, G., Conte-Junior, C. A., ... & Xiao, J. (2021). Available technologies on improving the stability of polyphenols in food processing. Food Frontiers, 2(2), 109-139.

[8] Lavanya, M., Namasivayam, S. K. R., & John, A. (2024). Developmental formulation principles of food preservatives by nanoencapsulation—fundamentals, application, and challenges. Applied Biochemistry and Biotechnology, 1-31.

[9] Chowdhury, S., Kar, K., & Mazumder, R. (2024). Exploration of different strategies of nanoencapsulation of bioactive compounds and their ensuing approaches. Future Journal of Pharmaceutical Sciences, 10(1), 72.

[10] Arratia-Quijada, J., Nuño, K., Ruíz-Santoyo, V., & Andrade-Espinoza, B. A. (2024). Nano-encapsulation of probiotics: Need and critical considerations to design new non-dairy probiotic products. Journal of Functional Foods, 116, 106192.

[11] Jurić, S., Jurić, M., Siddique, M. A. B., & Fathi, M. (2022). Vegetable oils rich in polyunsaturated fatty acids: Nanoencapsulation methods and stability enhancement. Food reviews international, 38(1), 32-69.

[12] Tahir, A., Shabir Ahmad, R., Imran, M., Ahmad, M. H., Kamran Khan, M., Muhammad, N., ... & Javed, M. (2021). Recent approaches for utilization of food components as nano-encapsulation: a review. International Journal of Food Properties, 24(1), 1074-1096.

[13] Ayyaril, S. S., Shanableh, A., Bhattacharjee, S., Rawas-Qalaji, M., Cagliani, R., & Shabib, A. G. (2023). Recent progress in micro and nano-encapsulation techniques for environmental applications: A review. Results in Engineering, 18, 101094.

[14] Janik, M., Hanula, M., Khachatryan, K., & Khachatryan, G. (2023). Nano-/Microcapsules, Liposomes, and Micelles in Polysaccharide Carriers: Applications in Food Technology. Applied Sciences, 13(21), 11610.

[15] Tomadoni, B., Fabra, M. J., Méndez, D. A., Martínez-Abad, A., & López-Rubio, A. (2022). Electrosprayed Agar Nanocapsules as Edible Carriers of Bioactive Compounds. Foods, 11(14), 2093.

[16] Dabholkar, N., Waghule, T., Rapalli, V. K., Gorantla, S., Alexander, A., Saha, R. N., & Singhvi, G.2021. Lipid shell lipid nanocapsules as smart generation lipid nanocarriers. Journal of Molecular Liquids, 339, 117145.

[17] Yan, X., Chai, L., Fleury, E., Ganachaud, F., & Bernard, J.2021. 'Sweet as a Nut': Production and use of nanocapsules made of glycopolymer or polysaccharide shell. Progress in Polymer Science, 120, 101429.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-08-07]

[DOI: 10.22034/FSCT.22.165.212]

[18] Xu, Y., Chen, H., Zhang, L., & Xu, Y.2023. Clove essential oil loaded chitosan nanocapsules on quality and shelf-life of blueberries. International Journal of Biological Macromolecules, 249, 1260-91.

[19] Ahmad, M., & Gani, A.2021. Ultrasonicated resveratrol loaded starch nanocapsules: Characterization, bioactivity and release behaviour under in-vitro digestion. Carbohydrate Polymers, 251, 117111.

[20] Uche, C. I., Tin Wui Wong, Philipp John.2021. Recent Advances in Spray Drying Technology for the Production of Nanoparticles: A Review. Nanoscale Advances, 3(12): 3465-3480.

[21] Deng, S., Gigliobianco, M. R., Censi, R., & Di Martino, P.2020. Polymeric nanocapsules as nanotechnological alternative for drug delivery system: Current status, challenges, and opportunities. Nanomaterials, 10(5): 847.

[22] González-Reza, R. M., Hernández-Sánchez, H., Quintanar-Guerrero, D., Alamilla-Beltrán, L., Cruz-Narváez, Y., & Zambrano-Zaragoza, M. L.2021. Synthesis, controlled release, and stability on storage of chitosan-thyme essential oil nanocapsules for food applications. Gels, 7(4), 212.

[23] Taylor, T. M., Weiss, J., Davidson, P. M., & Bruce, B. D. (2005). Liposomal Nanocapsules in Food Science and Agriculture. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 45(7–8), 587–605.

[24] Guía-García, J. L., Charles-Rodríguez, A. V., Reyes-Valdés, M. H., Ramírez-Godina, F., Robledo-Olivo, A., García-Osuna, H. T., Cerqueira, M. A., & Flores-López, M. L. (2022). Micro and nanoencapsulation of bioactive compounds for agri-food applications: A review. Industrial Crops and Products, 186: 115198.

[25] Aswathi, V. P., Meera, S., Maria, C. G. A., & et al.2023. Green synthesis of nanoparticles from biodegradable waste extracts and their applications: A critical review. Nanotechnology Reviews, 8: 377–397.

[26] De Conto, D., dos Santos, V., Zattera, A. J.2021. Swelling of biodegradable polymers for the production of nanocapsules and films with the incorporation of essential oils. Polymer Bulletin, 78: 7261–7278.

[27] Kothale, D., Verma, U., Dewangan, N., Jana, P., Jain, A., & Jain, D. (2020). Alginate as promising natural polymer for pharmaceutical, food, and biomedical applications. Current Drug Delivery, 17(9): 755-775.

[28] Maleki, G., Woltering, E. J., & Mozafari, M. R.2022. Applications of chitosan-based carrier as an encapsulating agent in food industry. Trends in Food Science & Technology, 120: 88-99.

[29] Tahir, A., Shabir Ahmad, R., Imran, M., Ahmad, M. H., Kamran Khan, M., Muhammad, N., … Javed, M.2021. Recent approaches for utilization of food components as nano-encapsulation: a review. International Journal of Food Properties, 24(1): 1074–1096.

[30] Pateiro, M., Gómez, B., Munekata, P. E. S., Barba, F. J., Putnik, P., Bursać Kovačević, D., & Lorenzo, J. M.2021. Nanoencapsulation of promising bioactive compounds to improve their absorption, stability, functionality, and the appearance of the final food products. Molecules, 26(6): 1547.

[31] Carrillo-Lopez, L. M., Garcia-Galicia, I. A., Tirado-Gallegos, J. M., Sanchez-Vega, R., Huerta-Jimenez, M., Ashokkumar, M., & Alarcon-Rojo, A. D.2021. Recent advances in the application of ultrasound in dairy products: Effect on functional, physical, chemical, microbiological, and sensory properties. Ultrasonics Sonochemistry, 73: 105467.

[32] Tabrizi, S., Mahdian, E., Mohammadi Sani, A., Sarabi -Jamab, M., Oroojalian, F.2022. Investigation of Antimicrobial Properties of Extract and Nano -extract of Arial Organ of Hypericum Perforatum. Journal of Food Science and Technology (Iran), 19(128): 259-270.

[33] Cerro, D., Rojas, A., Torres, A., Villegas, C., Galotto, M. J., Guarda, A., & Romero, J.2023. Nanoencapsulation of food-grade bioactive compounds using a supercritical fluid extraction of emulsions process: Effect of operational

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-08-07]

[DOI: 10.22034/FSCT.22.165.212]

variables on the properties of nanocapsules and new perspectives. LWT, 184: 115115.

[34] Sahoo, M., Vishwakarma, S., Panigrahi, C., & Kumar, J.2021. Nanotechnology: Current applications and future scope in food. Food Frontiers, 2(1): 3-22.

[35] Zabot, G. L., Rodrigues, F. S., Ody, L. P., Tres, M. V., Herrera, E., Palacin, H., Córdova-Ramos, J. S., Best, I., & Olivera-Montenegro, L.2022. Encapsulation of bioactive compounds for food and agricultural applications. Polymers, 14(19): 4194.

[36] Chopde, S., Datir, R., Deshmukh, G., Dhotre, A., & Patil, M.2020. Nanoparticle formation by nanospray drying & its application in nanoencapsulation of food bioactive ingredients. Journal of Agriculture and Food Research, 2, Article 100085.

[37] Seyed Hajizadeh, H., Zahedi, S. M., & Rezaie, S.2021. Effect of nano-encapsulation of rosemary in quality preserving and antioxidative activity of apricot (Prunus armeniaca cv. Tabarzeh) during storage life. Iranian Journal of Food Science and Technology, 18(117): 183-196.

[38] Mohebbat Mohebbi.2020. Chapter 11 - Nanoencapsulation of flavors for beverage manufacturing. In A. Amrane, S. Rajendran, T. A. Nguyen, A. A. Assadi, & A. M. Sharoba (Eds.), Nanotechnology in the beverage industry (pp. 317-336). Elsevier.

[39] Cetinkaya, T., & Ayseli, M. T. (2024). A systematic review on nano-delivery systems enriched with aromatic compounds: Flavor, odor, and chemical quality perspectives in fish. Food Chemistry Advances, 5: 100750.

[40] Soleimanpour, M., Taghizadeh, M., & Fathollahi, I.2020. Nanoencapsulation strategies for improving bioavailability and stability of fat-soluble vitamins. Journal of Food Science and Technology, 57(4): 1311-1320.

[41] Sadr, B., Alizadeh, A., Tabibiazar, M., Hamishehkar, H., & Roufegarinejad, L.2023. Evaluation of the stability of VitD3 loaded zein hydrolysate nanocapsules in orange juice by ultrasound and its effect on the properties of orange juice. Journal of Food Science and Technology, 19(1): 17-29.

[42] Ojeda-Piedra, S. A., Zambrano-Zaragoza, M. L., González-Reza, R. M., García-Betanzos, C. I., Real-Sandoval, S. A., & Quintanar-Guerrero, D. (2022). Nano-Encapsulated Essential Oils as a Preservation Strategy for Meat and Meat Products Storage. Molecules, 27(23): 8187.

[43] Yeganeh, S., & Reyhani Poul, S.2023. Use of nanocapsules carrying astaxanthin from Haematococcus microalgae coated by maltodextrin-sodium caseinate as a substitute for sodium nitrite in formulation of common sausage and evaluating microbial and texture properties of the product. Journal of Food Science and Technology, 19(1): 143-159.

[44] Soni, M., Maurya, A., Das, S., Prasad, J., Yadav, A., Singh, V. K., Singh, B. K., Dubey, N. K., & Dwivedy, A. K.2022. Nanoencapsulation strategies for improving nutritional functionality, safety and delivery of plant-based foods: Recent updates and future opportunities. Plant Nano Biology, 1: 100004.

[45] Tiwari, S., & Dubey, N. K.2022. Nanoencapsulated essential oils as novel green preservatives against fungal and mycotoxin contamination of food commodities. Current Opinion in Food Science, 45: 100831.

[46] Zhu, X., Blanco, E., Bhatti, M., & Borrion, A.2021. Impact of metallic nanoparticles on anaerobic digestion: A systematic review. Science of The Total Environment, 757: 143747.

[47] Rubio, L., Barguilla, I., Domenech, J., Marcos, R., & Hernández, A.2020. Biological effects, including oxidative stress and genotoxic damage, of polystyrene nanoparticles in different human hematopoietic cell lines. Journal of Hazardous Materials, 398: 122900.

[48] Rad, L. M., Arellano, G., Podojil, J. R., O'Konek, J. J., Shea, L. D., & Miller, S. D.2024. Engineering nanoparticle therapeutics for food allergy. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 153(3): 549-559.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-08-07]

[DOI: 10.22034/FSCT.22.165.212]

[49] Lobel, B. T., Baiocco, D., Al-Sharabi, M., Routh, A. F., Zhang, Z., & Cayre, O. J.2024. Current challenges in microcapsule designs and microencapsulation processes: A review. ACS Applied Materials & Interfaces, 16(31): 40326-40355.

[50] Elkalla, E., Khizar, S., Tarhini, M., Lebaz, N., Zine, N., Jaffrezic-Renault, N., … Elaissari, A.2023. Core-shell micro/nanocapsules: from encapsulation to applications. Journal of Microencapsulation, 40(3): 125–156.

[51] Mondéjar-López, M., García-Simarro, M. P., Navarro-Simarro, P., Gómez-Gómez, L., Ahrazem, O., & Niza, E.2024. A review on the encapsulation of "eco-friendly" compounds in natural polymer-based nanoparticles as next generation nano-agrochemicals for sustainable agriculture and crop management. International Journal of Biological Macromolecules, 280(3): 136030.

[52] Kumar, S., Bhuvaneshwari, R., Jain, S., Nirwan, S., Fatima, Z., Kumar, D., Chhikara, B. S., Rathi, B., & Poonam.2024. A systematic review on pesticide-loaded nanocapsules: A sustainable route for pesticide management to enhance crop productivity. Current Nanoscience, 20(3): 280-297.

[53] Kala, S., Sogan, N., Naik, S. N.2020. Impregnation of pectin-cedarwood essential oil nanocapsules onto mini cotton bag improves larvicidal performances. Scientific Reports, 10: 14107.

[54] Liu, L.-W., Ding, Z.-H., Ren, G.-G., Wang, G.-D., Pan, X., Wei, G.-H., Zhou, X., Wu, Z.-B., Jin, Z.-C., Chi, Y. R., & Yang, S.2023. Inorganic nanoparticles-driven self-assembly of natural small molecules in water for constructing multifunctional nanocapsules against plant diseases. Chemical Engineering Journal, 475: 146041.

[55] Ives, C.-S., Martins Feitosa, N., Fukushima, H. C. S., Borra, R. C., Foglio, M. A., Pazini Xavier, R. M., de Melo Hoyos, D. C., de Oliveira Sousa, I. M., Galdino de Souza, G., Lacava Bailone, R., de Andrade Belo, M. A., Correia, S. A. M., Dias Corrêa Junior, J., Pierezan, F., & Malafaia, G.2021. Effects of nanocapsules of poly-ε-caprolactone containing artemisinin on zebrafish early-life stages and adults. Science of The Total Environment, 756: 143851.

[56] Budel, R. G., da Silva, D. A., Moreira, M. P., Dalcin, A. J. F., da Silva, A. F., Nazario, L. R., Majolo, J. H., Lopes, L. Q. S., Santos, R. C. V., Soares, F. A. A., da Silva, R. S., Gomes, P., & Boeck, C. R. 2020. Toxicological evaluation of naringin-loaded nanocapsules in vitro and in vivo. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 188: 110754.

[57] Hérault, N., Wagner, J., Abram, S. L., Widmer, J., Horvath, L., Vanhecke, D., … Fromm, K. M.2020. Silver-Containing Titanium Dioxide Nanocapsules for Combating Multidrug-Resistant Bacteria. International Journal of Nanomedicine, 15: 1267–1281.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-08-07]

[DOI: 10.22034/FSCT.22.165.212]

Journal of Food Science and Technology (Iran)

Homepage:www.fsct.modares.ir

Scientific Research

Nanoencapsulation in food industry: technology, applications and challenges; a review

Mohammadyar Hosseini[1], Mohammad Kurd[2]

1- Associate Professor, Department of Food Science, Faculty of Interdisciplinary Science and Technology University of Bonab, Bonab, Iran

2- Bachelor student of food hygiene, Faculty of paraveterinary, Ilam University, Ilam, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received:2025/2/14

Accepted:2025/5/28

Keywords:

Nanocapsule,

Nanoparticles,

Nanoencapsulation,

Bioavailability,

Nano-safety.

DOI: **10.22034/FSCT.22.165.212.**

*Corresponding Author E-

m.hosseini@ubonab.ac.ir*

ABSTRACT

Nanocapsulation, as an innovative technology in the food industry, has great potential to improve the quality, safety, and stability of food products. This technology prevents the degradation of bioactive compounds such as vitamins, antioxidants, and antimicrobial agents by encapsulating them at the nanoscale, protecting them from environmental factors like light, temperature, and oxygen, while facilitating their controlled and targeted release. This feature enhances the shelf life and efficacy of active compounds in food products. Additionally, nanocapsules can improve consumer experiences through the gradual release of nutrients and flavorings. However, the use of nanocapsulation in the food industry faces challenges, including high production costs, safety concerns related to nanoparticles, and their long-term effects on human health. This article reviews various nanocapsulation technologies, including physical, chemical, and biological methods, and their applications in enhancing the stability and quality of food products. Furthermore, the existing challenges in this technology, including environmental issues and economic limitations, will be evaluated. Despite the numerous advantages, further research is needed to assess the safety and long-term impacts of nanoparticles so that the safe and effective use of this technology can be expanded in the food and pharmaceutical industries.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-08-07]

[DOI: 10.22034/FSCT.22.165.212]