



فناوری نانو در غذاهای کاربردی و انتقال موثر زیست فعال

عسل علمداری ، محمد مهدی فرج پور ، رقیه غنی

چکیده

در دهه های اخیر، فناوری نانو به عنوان یکی از نوآورانه ترین دستاورد های علمی، تأثیری شگرف بر علوم غذایی و به ویژه در طراحی و توسعه ی غذا های کاربردی بر جای گذاشته است. استفاده از نانو ذرات در صنایع غذایی نه تنها منجر به بهبود پایداری، رهایش کنترل شده و افزایش زیست دسترسی ترکیبات زیست فعال مانند آنتی اکسیدان ها، ویتامین ها و پروبیوتیک ها شده، بلکه افق های جدیدی در افزایش ایمنی و ماندگاری مواد غذایی گشوده است. در این مقاله مروری، ابتدا به مبانی سنتز، طبقه بندی و ویژگی های فیزیکی شیمیایی نانوذرات پرداخته شده و انواع ساختارهای نانومتری با کاربردهای گوناگون در سیستم های زیستی معرفی می شوند. سپس کاربرد ویژه ی نانوذرات اکسید روی^۱ در علوم زیستی، از جمله خاصیت ضد میکروبی، آنتی اکسیدانی و نقش آن ها در بهبود کیفیت محصولات غذایی بررسی می گردد. در ادامه، فناوری بسته بندی های نانویی و هوشمند به عنوان رویکردی نوین برای افزایش ماندگاری و ایمنی مواد غذایی مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین، اهمیت نانو فناوری در ارتقای سلامت مواد غذایی و نقش کلیدی آن در بهبود انتقال و بقای پروبیوتیک ها در محیط گوارشی تبیین شده است. در پایان، به پیامدهای احتمالی مواجهه انسان و محیط زیست با نانو ذرات، سمیت احتمالی، راهکارهای مدیریت خطر و چشم انداز های آینده ی این فناوری پرداخته می شود. به طور کلی، نانو فناوری به عنوان پلی میان علم مواد و علوم تغذیه، نقشی تعیین کننده در نسل آینده ی غذا های فراسودمند و ایمن ایفا می کند.

مواد و روش کار : این مطالعه از نوع مروری غیر نظام مند بوده و جست و جو از طریق پایگاه اطلاعاتی world cat ، web of science ، Google scholar با کلید واژه های Nanostructures and Food packaging ، Nanotechnology in food science ، their applications در سال های (۲۰۰۶ تا ۲۰۲۵) و همچنین با محوریت قرار دادن کتاب مرجع Nanotechnology and functional foods (نوشته شده در سال ۲۰۲۵ میلادی) انجام شده است. تعداد مقالات مربوطه در این حوزه بسیار محدود بوده و در گردآوری این مطالعه از شش عنوان مقاله به همراه رفرنس کتاب مذکور استفاده به عمل آمده است.

کلید واژه ها : فناوری نانو ، نانوفناوری در صنایع غذایی ، نانوحامل ها ، نانو کپسوله سازی ، نانوامولسیون ، سیستم های انتقال زیست فعال ، رهایش کنترل شده ، زیست دسترسی ، پایداری ترکیبات فعال ، غذاهای کاربردی و پروبیوتیک ها.

^۱ (ZnO NPs)



مقدمه

در دهه های اخیر، فناوری نانو^۲ به عنوان یکی از پیشرفت های بنیادین قرن بیست و یکم، نقش چشمگیری در توسعه علوم گوناگون ایفا کرده است. [۱] این فناوری با دستکاری و مهندسی مواد در مقیاس نانومتر (۱ تا ۱۰۰ نانومتر)، امکان ایجاد ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و زیستی منحصر به فرد را فراهم می آورد که در ابعاد بزرگ تر مشاهده نمی شوند. از میان ساختارهای نانویی، نانو ذرات^۳ و نانو ساختارها^۴ از مهم ترین اجزا هستند که در حوزه های گوناگونی همچون پزشکی، زیست فناوری، صنایع غذایی، محیط زیست و انرژی کاربرد یافته اند. [۲]

فرآیند سنتز نانو ذرات به روش های فیزیکی، شیمیایی و زیستی انجام می شود و انتخاب روش سنتز تأثیر مستقیمی بر اندازه، شکل، پایداری و عملکرد آن ها دارد [۳]. بررسی انواع مختلف نانو ذرات از جمله نانو ذرات فلزی، اکسیدی و پلیمری، نشان می دهد که هر کدام از آن ها قابلیت های خاصی در زمینه های صنعتی و زیستی دارند. به عنوان مثال، نانو ذرات اکسید روی^۵ به دلیل خاصیت های ضد باکتریایی، ضد قارچی و فوتوکاتالیستی خود، در علوم زیستی و داروسازی کاربرد فراوانی یافته اند. [۴]

در حوزه علوم و صنایع غذایی، فناوری نانو با توسعه ی بسته بندی های نانو و هوشمند، انقلابی در افزایش ماندگاری، ایمنی و کیفیت مواد غذایی ایجاد کرده است. [۵] این نوع بسته بندی ها قادرند در برابر نفوذ گاز، رطوبت و میکروارگانیسم ها مقاومت کنند و حتی وضعیت تازگی یا فساد مواد غذایی را از طریق حسگر های نانویی گزارش دهند. همچنین، نانو ذرات در سلامت مواد غذایی نقش کلیدی ایفا می کنند؛ از جمله در شناسایی آلاینده ها، بهبود ویژگی های حسی و تغذیه ای، و افزایش زیست دسترسی مواد مفید. [۶]

از سوی دیگر، یکی از کاربردهای نوظهور این فناوری، استفاده از نانو حامل ها در انتقال پروبیوتیک ها است. نانو ساختار های زیست سازگار می توانند با حفاظت از باکتری های مفید در برابر شرایط نامطلوب گوارشی، کارایی زیستی آن ها را در بدن انسان افزایش دهند و در بهبود سلامت گوارشی نقش مؤثری داشته باشند. [۷]

^۲ (Nanotechnology)

^۳ (Nanoparticles)

^۴ (Nanostructures)

^۵ (ZNO NPs)



با وجود مزایای گسترده، نگرانی هایی نیز در خصوص اثرات نانو ذرات بر سلامت انسان و محیط زیست مطرح است. بررسی های سم شناسی نشان داده اند که برخی نانو ذرات ممکن است با تجمع در بافت ها یا ورود به زنجیره غذایی، اثرات زیان آوری بر موجودات زنده داشته باشند [۸]. از این رو، مطالعه ای دقیق سمیت، مسیرهای مواجهه، روش های کنترل خطرات و تدوین استانداردهای ایمنی برای استفاده پایدار از فناوری نانو ضروری است. [۹]

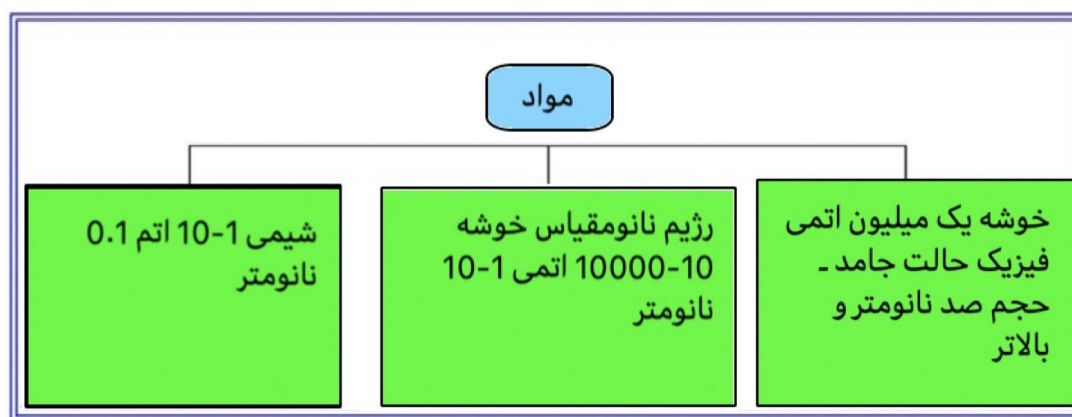
در مجموع، فناوری نانو پلی میان علوم پایه، مهندسی، زیست فناوری و علوم غذایی ایجاد کرده است. این مقاله مروری با هدف بررسی جنبه های مختلف نانوساختار ها و نانو ذرات، روش های سنتز، کاربردهای زیستی و غذایی، و نیز چالش های ایمنی و زیست محیطی آنها تدوین شده است تا تصویری جامع از نقش چند بعدی این فناوری نوین در بهبود کیفیت زندگی انسان ارائه دهد [۱۰].

۱- ساختارهای نانو و کاربردهای آنها و یک مرور بر نانو ذرات سنتز و انواع آنها

(۱-۱) مفاهیم بنیادی نانو تکنولوژی

نانو تکنولوژی به ایجاد و به کارگیری موادی اطلاق می شود که اجزای تشکیل دهنده آنها در مقیاس نانومتر وجود داشته و به طور قراردادی تا اندازه ۱۰۰ نانومتر باشند. نانو تکنولوژی فعالیت الکتریکی، نوری و مغناطیسی و همچنین رفتار ساختاری در سطح مولکولی و زیر مولکولی را بررسی می کند [۱۱]. نانو ذرات به عنوان اجسامی تعریف می شوند که اندازه آنها در محدوده ۱-۱۰۰ نانومتر قرار دارد و به دلیل اندازه خود ممکن است با ماده حجیم متفاوت باشند [۱۲].

درک این مفاهیم پایه برای توسعه سیستم های نوین در بسته بندی، نگهداری و بهبود کیفیت مواد غذایی ضروری است.



تصویر (۱-۱) این نمودار رابطه اندازه بین حوزه های شیمی، ریزذرات و فیزیک حالت جامد را نشان می دهد.



تصویر (۱-۲) این نمودار تقاطع رشته‌های علمی مختلف در نانوتکنولوژی را نمایش می‌دهد.

(۱-۲) طبقه بندی نانو ساختار ها

نانو مواد را می‌توان بر اساس بعدیت و درجه مدولاسیون (μ) دسته بندی کرد. سیگال روشی زیبا برای دسته بندی مواد نانو فاز بر اساس بعدیت مدولاسیون پیشنهاد کرده است [۱۳]. به طور کلی، مواد نانو ساختار در مقیاس طولی چند نانومتر در صفر، یک، دو یا سه بعد مدوله می‌شوند:

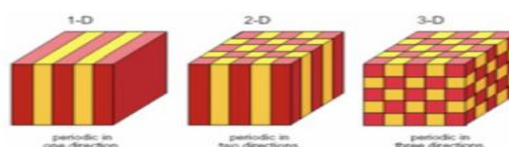
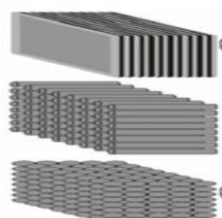
$\mu=0$ مواد مدوله نشده (خوشه های مجزا)

$\mu=1$ مواد مدوله شده در یک بعد (چندلایه ها)

$\mu=2$ مواد مدوله شده در دو بعد (لایه های دانه ریز)

$\mu=3$ مواد مدوله شده در سه بعد (مواد نانو ساختار فشرده) [۱۴]

این طبقه بندی در طراحی مواد بسته بندی فعال و هوشمند کاربرد مستقیم دارد.



تصویر ۱-۰

تصویر (۱-۲) این تصویر، مقیاس بندی مواد: درجه محصور شدگی را نشان می‌دهد.



(۱-۳) تغییرات خواص در مقیاس نانو

تمامی مواد فلزات، نیمه هادی ها یا عایق ها در زیر یک اندازه بحرانی، خواص فیزیکی-شیمیایی وابسته به اندازه دارند. [۱۵]
خواص مکانیکی: مواد نانو ساختار مدول الاستیک و چگالی کاهش یافته دارند. سختی یا استحکام با کاهش اندازه ۴ الی ۵ برابر افزایش می‌یابد. [۱۶]

خواص حرارتی: نقطه ذوب با کاهش اندازه ذره پایین می‌آید. گرمای ویژه و انبساط حرارتی ممکن است تا ۵۰٪ یا بیشتر با کاهش اندازه ذره افزایش یابد. [۱۷]

خواص نوری: رنگ و شفافیت مواد با تغییر اندازه نانو ذرات تغییر می‌کند. به دلیل افزایش گاف باند مؤثر مواد، طیف جذب به سمت انرژی بالاتر جابجا می‌شود. [۱۸]
دلایل خواص نوظهور: عبارت‌اند از افزایش نسبت سطح به حجم ، اثر اندازه کوانتومی ، انقباض شبکه.

(۱-۴) روش های سنتز نانو مواد

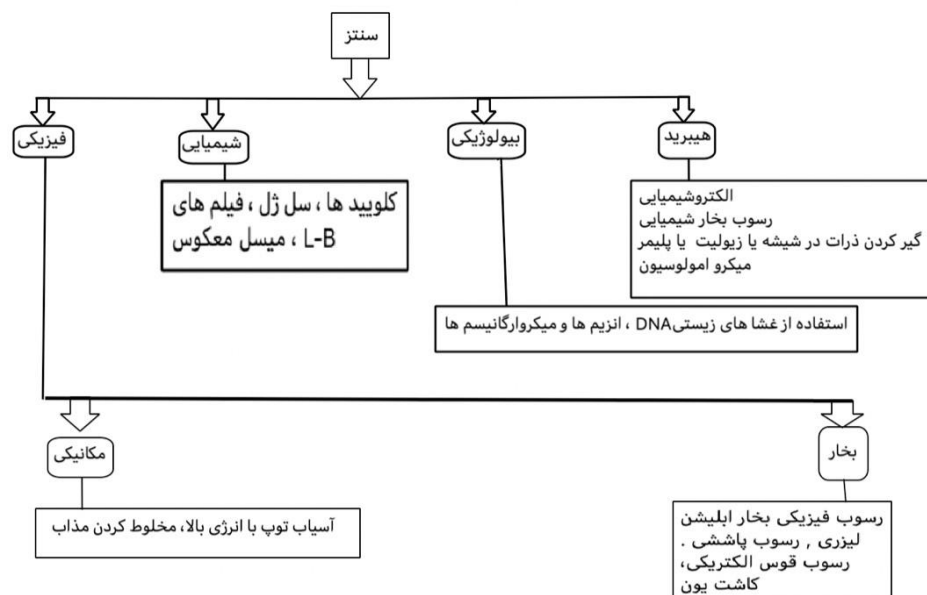
سنتز نانو ذرات می‌تواند به دو روش شیمیایی یا زیستی انجام شود. اثرات نامطلوب بسیاری با روش های سنتز شیمیایی به دلیل وجود برخی مواد شیمیایی سمی جذب شده روی سطح همراه بوده است. [۱۹]

روش های فیزیکی: شامل فرایند های ادغام ، تجمع گاز از مونومر ، تبخیر در گاز خنثی ، پاشش ، روش پرتو یونی ، آسیاب گلوله‌ای ، لیتوگرافی می باشند. [۲۰]

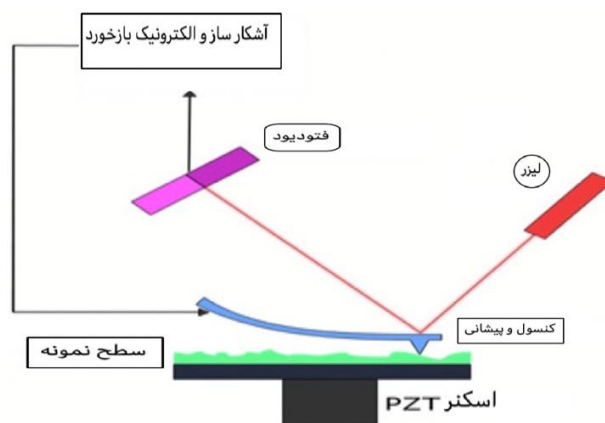
روش های شیمیایی: شامل فرایند های رسوب شیمیایی و پوشش دهی ، روش سل-ژل ، ریز امولسیون ، سنتز فاز چگال ، تکنیک کاهش ، رسوب الکتروشیمیایی می باشند. [۲۱]

سنتز زیستی: سنتز زیستی نانو ذرات توسط میکروارگانیسم ها یک فناوری سبز و دوستدار محیط زیست است. میکروارگانیسم های گوناگون برای سنتز نانو ذرات فلزی استفاده می‌شوند. [۲۲]

سنتز زیستی نانو ذرات برای تولید مواد ضد میکروب طبیعی در بسته بندی مواد غذایی امیدوار کننده است.



تصویر (۱-۴-۱) این جدول سنتز نانوذرات فلزی توسط میکروارگانیسم های مختلف را نشان می‌دهد.



تصویر (۱-۴-۲) این فلوچارت روش های مختلف سنتز نانومواد را دسته‌بندی کرده است.

(۱-۵) انواع نانوذرات فلزی

نانو ذرات نقره: به دلیل کارایی ضد میکروبی خوب در برابر باکتری ها، ویروس ها و سایر میکروارگانیسم های یوکاریوتی مؤثرترین ثابت شده‌اند [۲۳]

نانو ذرات طلا: در مطالعات ایمونوشیمیایی برای شناسایی برهمکنش های پروتئینی استفاده می‌شوند. [۲۴]

نانو ذرات آلایژی: خواص ساختاری نشان می‌دهند که با نمونه های حجیم آنها متفاوت است. [۲۵]



نانو ذرات مغناطیسی: برای درمان هدفمند سرطان و تصویربرداری تشدید مغناطیسی بررسی شده‌اند. [۲۶]

-نانو ذرات نقره در بسته‌بندی مواد غذایی برای خاصیت ضد میکروبی کاربرد گسترده‌ای دارند. [27]

(۱-۶) نانو مواد خاص

فولرن^۶ ها: مولکول های بسیار بزرگی از کربن با ۶۰، ۷۰ یا اتم های بیشتر روی سطح یک ساختار قفسه ای تقریباً کروی

. [۲۸]



تصویر (۱-۶) فولرن

نانو لوله های کربنی: استوانه هایی از ورق های گرافیت که می‌توانند چند دیواره^۷ یا تک دیواره^۸ باشند. [۲۹]

سیلیکون متخلخل : با اندازه منافذ نانو، به ماده گاف باند مستقیم تبدیل می‌شود و گسیل نور در محدوده مرئی دارد.

[۳۰]

آئروژل‌ها: مواد با چگالی فوق العاده کم که از اتصال ذرات در اندازه نانومتر تشکیل می‌شوند. [۳۱]

ذرات هسته پوسته: کلاس نوینی از مواد نانو کامپوزیتی که در آن یک لایه نازک نانومتری روی ماده دیگری پوشش داده می‌شود

[۳۲]

نانو مواد متخلخل در جذب آلاینده ها و بهبود کیفیت مواد غذایی کاربرد دارند.

⁶ Fullerene

⁷ (MWCNT)

⁸ (SWCNT)



Fig. 9 Aerogels

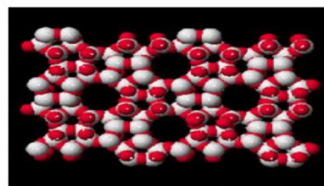


Fig. 10 Zealites

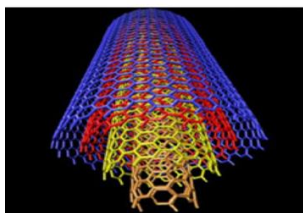


Fig. 11 Multiwall CNTS

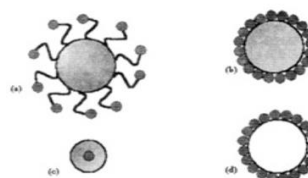


Fig. 12 Core-Shell Structures

تصویر (۶-۱) آئروژل‌ها، زئولیت‌ها، نانولوله‌های کربنی چنددیواره، ساختارهای هسته-پوسته.

(۷-۱) کاربردهای نانوتکنولوژی

نانوتکنولوژی در توسعه سیستم‌های بسته‌بندی هوشمند و کنترل کیفیت مواد غذایی تحول آفرین است. که ابزارهای آن عبارتند از:

-ابزارهای برش سخت و سفت تر

-سرامیک‌های چکش خوار و ماشین‌کاری پذیر

-فسفر برای تلویزیون با وضوح بالا

-فیلترها و تضعیف‌کننده‌های نوری

-لیزرها با جریان آستانه پایین

-حذف آلاینده‌ها

-آهنرباهای پرقدرت [۳۳]



تصویر (۷-۱) فلورسانس نانوذرات CdSe با اندازه های مختلف تحت نور UV

(۸-۱) مشخصه یابی نانومواد

به دو دسته تکنیک های مستقیم و غیر مستقیم طبقه بندی می شوند. این تکنیک ها برای کنترل کیفیت و بهینه سازی نانومواد مورد استفاده در صنایع غذایی ضروری هستند.

تکنیک های مستقیم شامل: میکروسکوپ نیروی اتمی^۹، میکروسکوپ الکترونی عبوری^{۱۰}، میکروسکوپ الکترونی روبشی [۳۴]^{۱۱} می باشند.

تکنیک های غیرمستقیم شامل: طیف جذب، پراش پرتو ایکس، طیف سنجی رامان [۳۵] می باشند.

^۹ (AFM)

^{۱۰} (TEM)

^{۱۱} (SEM)

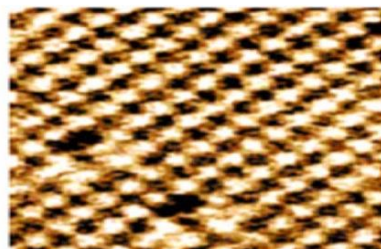


Fig 6 (a). AFM image of NaCl

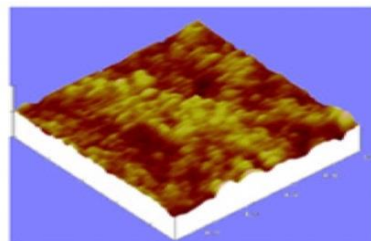


Fig 6 (b). AFM of ZnS:Mn nanoparticles

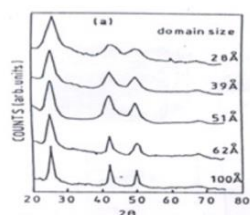


Fig. 7 XRD of InAs nanoparticles

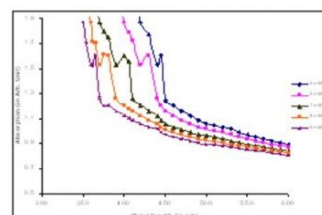


Fig. 8 Absorption Spectra CdSe Nanoparticles

تصویر (۸-۱) میکروسکوپ نیروی اتمی، تصویر AFM از NaCl و نانوذرات ZnS Mn، الگوی پراش پرتو ایکس نانوذرات CdSe، InAs، طیف جذب نانوذرات

۲- مروری بر کاربرد نانو ذرات اکسید روی، در علوم زیستی

(۲-۱) روش های سنتز و شناسایی نانو ذرات اکسید روی

نانو ذرات اکسید روی^{۱۲} با روش های شیمیایی، فیزیکی و زیستی سنتز می شوند.

در میان روش های شیمیایی، (سل-ژل)^{۱۳}، (بارش)^{۱۴} و هیدروترمال^{۱۵} بیشترین استفاده را دارند. روش، (سل-ژل) با کنترل دقیق شرایط، ذرات یکنواخت تولید می کند، اما به مواد شیمیایی حساس نیاز دارد. روش رسوب دهی به دلیل سادگی و هزینه پایین برای تولید انبوه مناسب است.

روش های فیزیکی مانند تبخیر بخار و اسپاترینگ (کندوپاش) محصولی با خلوص بالا می دهند ولی هزینه و مصرف انرژی زیادی دارند.

در مقابل، (سنتز سبز) با استفاده از عصاره گیاهان (مانند آزادیراچتا ایندیکا^{۱۶} (آلوئه ورا)^{۱۷}) و میکروارگانیسمها، ذراتی پایدار و زیست سازگار ایجاد می کند.

^{۱۲} (ZnO-NPs)

^{۱۳} sol-gel

^{۱۴} precipitation

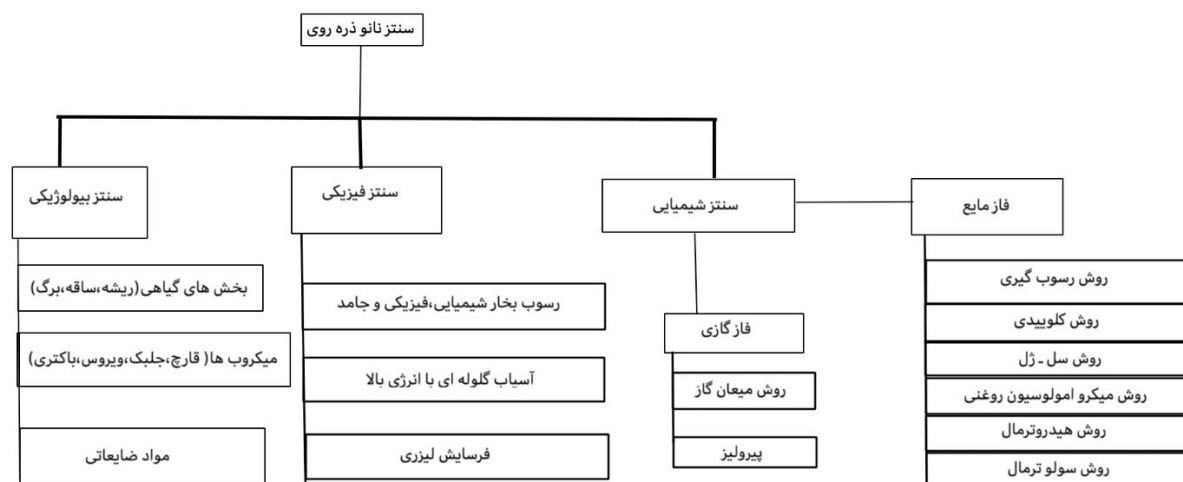
^{۱۵} hydrothermal

^{۱۶} Azadirachta indica

^{۱۷} Aloe vera



شناسایی ساختاری و سطحی با روش های (بررسی فاز ورتزیت)^{۱۸}، (مشاهده شکل و اندازه)^{۱۹}، (تعیین پیوند Zn-O)^{۲۰} و (بررسی شکاف باند نوری حدود ۳۶۵ نانومتر)^{۲۱} انجام می‌شود. [۳۶]



تصویر (۱-۲) روش های متفاوت سنتز نانو ذرات روی

(۲-۲) ویژگی های فیزیکی شیمیایی و رفتار زیستی

اندازه و مورفولوژی ZnO-NPs تعیین کننده فعالیت زیستی و سمیت آنها است. ذرات کوچک تر از ۳۰ نانومتر به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، فعال تر ولی بالقوه سمی ترند.

بار سطحی مثبت باعث تعامل قوی تر با غشای منفی باکتری ها و سلول های سرطانی می‌شود.

در ساختار ورتزیت ZnO، نقایص بلوری و آزادسازی یون های Zn^{2+} موجب تولید گونه های واکنشی اکسیژن (ROS) مانند H_2O_2 و O_2^- می‌شود که منشاء بیشتر اثرات زیستی ZnO-NPs هستند.

¹⁸ XRD

¹⁹ SEM/TEM

²⁰ FTIR

²¹ UV-Vis



در نمودار FTIR، باند 450 cm^{-1} نشانه پیوند Zn-O و وجود گروه های OH- سطحی است که فعالیت نانو ذره را افزایش می‌دهد.

تجزیه ZnO در محیط اسیدی سبب آزاد شدن Zn^{2+} می‌شود که در غلظت های بالاتر از ۱۵ ppm برای سلول های پستانداران سمی است. [۳۷]

(۲-۳) فعالیت ضد باکتریایی

ZnO-NPs اثرات ضد باکتریایی گسترده‌ای در برابر باکتری های گرم مثبت و گرم منفی دارند.

مکانیسم های اصلی عبارت اند از:

۱- تولید ROS که به غشای سلولی آسیب می‌زند.

۲- تماس مستقیم ذرات با دیواره سلولی.

۳- آزادسازی یون های Zn^{2+} که متابولیسم باکتری را مختل می‌کند.

ترکیب ZnO با پلیمر های زیستی نظیر کیتوسان اثر ضد باکتریایی را تقویت و سمیت را کاهش می‌دهد. [۳۸]

(۲-۴) اثرات ضد سرطانی و مکانیسم ها

ZnO-NPs در سلول های سرطانی موجب (مرگ برنامه ریزی شده (آپوپتوز)) از طریق افزایش ROS، اختلال در عملکرد

میتوکندری، شکست DNA و فعال سازی مسیرهای p۵۳ و Caspase می‌شوند.

در مطالعات، روی سلول های سرطان پستان، کبد، ریه و کولون، کاهش چشمگیر زنده‌مانی سلول ها پس از تیمار با غلظت ۵۰ $\mu\text{g/mL}$ گزارش شد.

تصاویر فلورسانسی کاهش شدت رنگ DAPI و تغییر مورفولوژی هسته را نشان می‌دهد.

ZnO-NPs انتخاب پذیری بالایی دارند؛ سلول های سالم در همان غلظت کمتر آسیب می بینند.

نانو کامپوزیت های ZnO-PEG و ZnO-chitosan زیست‌سازگاری و پایداری را بهبود می‌دهند. [۳۹]



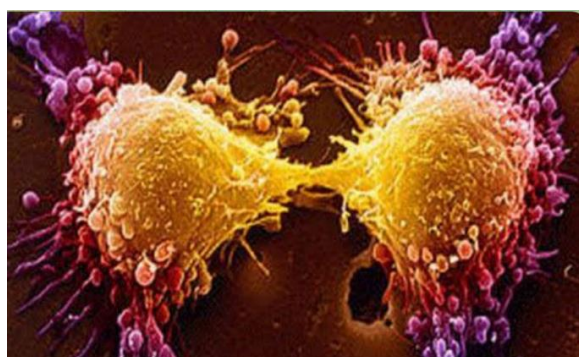
(۲-۵) تاثیر بر رگزایی و ترمیم زخم

روی، عنصر کلیدی در رشد بافت و رگزایی است ZnO-NPs. با آزادسازی کنترل شده Zn^{2+} می‌توانند تکثیر سلول‌های اندوتلیال^{۲۲} و تشکیل رگ‌های خونی جدید را تحریک کنند.

در غلظت‌های بالا اثر بازدارنده دارند و این موضوع برای کاربردهای درمان سرطان و ضد آنژیوژنز مهم است.

در مدل‌های حیوانی، پانسمان‌های حاوی ZnO موجب تسریع ترمیم زخم، افزایش اپیتلیالیزاسیون^{۲۳} و کاهش عفونت شده‌اند.

[۴۰]



تصویر (۲-۵) رگزایی

(۲-۶) اثرات ضد دیابتی

ZnO-NPs می‌توانند متابولیسم گلوکز را بهبود بخشند و استرس اکسیداتیو^{۲۴} را در دیابت کاهش دهند.

در مدل‌های موش دیابتی، تزریق یا مصرف خوراکی ZnO-NPs موجب کاهش قند خون ناشتا، افزایش سطح انسولین و کاهش پراکسیداسیون^{۲۵} لیپیدی شد.

در تصاویر بافت‌شناسی پانکراس، سلول‌های β حفظ شده و نکروز کاهش یافته است.

غلظت مناسب (۵۰ mg/kg) بیشترین اثر را نشان داده است. [۴۱]

^{۲۲} Endothelial

^{۲۳} Epithelialization

^{۲۴} Oxidative

^{۲۵} Peroxidation



(۲-۷) سامانه های دارورسانی هدفمند

$ZnO-NPs$ به عنوان حامل های دارویی هوشمند شناخته می شوند زیرا در محیط اسیدی تومور تجزیه شده و یون Zn^{2+} آزاد می کنند.

داروهایی مانند دوکسوروبیسین^{۲۶}، کورکومین^{۲۷} و پاکلیتاکسل^{۲۸} در سطح ZnO بارگذاری شده اند. [۴۲]

(۲-۸) مهندسی بافت و داربست های زیستی

ترکیب $ZnO-NPs$ با پلیمر های زیستی مانند PLA، PCL و نانوسلولز باعث بهبود استحکام مکانیکی، خاصیت ضدباکتریایی و افزایش چسبندگی سلول ها به داربست می شود.

در تصاویر SEM، رشد بهتر سلول های فیبروبلاست بر سطح داربست حاوی ZnO مشاهده شده است.

این داربست ها در ترمیم استخوان و پوست در مدل های حیوانی موفق عمل کرده اند.

ZnO همچنین در چاپ سه بعدی برای ساخت سازه های زیستی دقیق استفاده شده است. [۴۳]

(۲-۹) سمیت و ایمنی زیستی

میزان سمیت $ZnO-NPs$ به اندازه، غلظت، زمان تماس و نوع سلول بستگی دارد.

مکانیسم های اصلی سمیت شامل تولید بیش از حد ROS، آزادسازی Zn^{2+} ، تخریب غشا و اختلال در عملکرد میتوکندری است.

در غلظت های بالاتر از ۱۵ ppm، آسیب سلولی، کاهش زنده ماندن و التهاب بافتی در کبد و کلیه گزارش شده است.

پوشش دهی سطحی با پلیمر هایی مانند PEG و پلی وینیل الکل موجب کاهش قابل توجه سمیت می شود. [۴۴]

_ نانوذرات اکسید روی به عنوان ساختار هایی چند منظوره در حوزه های زیستی و پزشکی توانسته اند جایگاه ویژه ای پیدا کنند.

^{۲۶} Doxorubicin

^{۲۷} Curcumin

^{۲۸} Paclitaxel

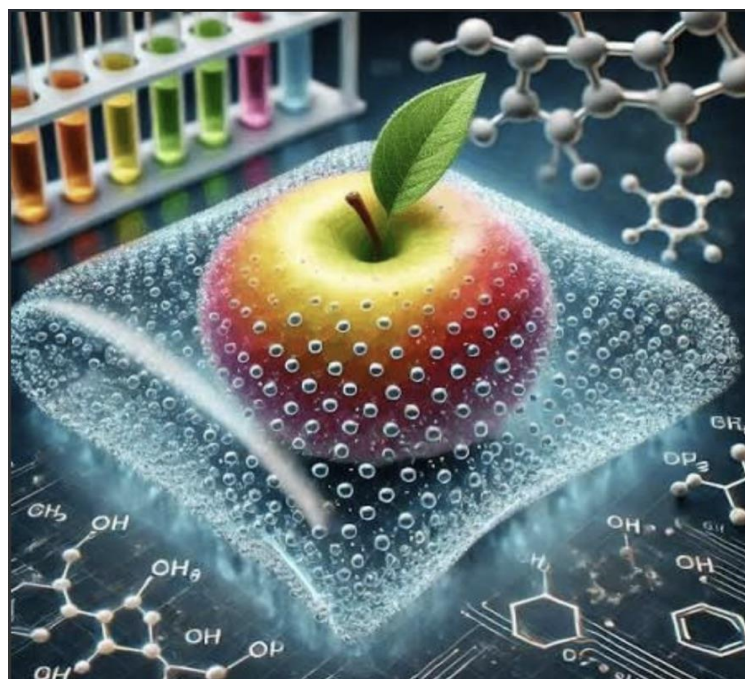


کاربردهای بالقوه آن‌ها از فعالیت ضدباکتریایی و ضد سرطانی گرفته تا دارورسانی هدفمند، ترمیم زخم و مهندسی بافت گسترده است.

با این حال، بررسی دقیق سمیت، پایداری زیستی و مسیرهای مولکولی ضروری است.

چشم‌انداز آینده بر توسعه سنتزهای سبز، افزایش زیست‌سازگاری و طراحی سامانه‌های هوشمند دارورسانی متمرکز خواهد بود. _ نانوذرات اکسید روی (ZnO-NPs) از پرکاربردترین نانوذرات فلزی هستند که به دلیل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی منحصر به فرد خود، در دهه‌ی اخیر توجه گسترده‌ای را در حوزه‌های زیستی، پزشکی، دارویی و مهندسی بافت به خود جلب کرده‌اند. این نانوذرات به سبب اندازه‌ی کوچک، سطح ویژه‌ی بالا و خواص فوتوکاتالیستی قابل کنترل، قابلیت تعامل با سلول‌ها و مولکول‌های زیستی را دارند و همین امر، بستر مناسبی را برای استفاده در درمان، تشخیص و زیست‌فناوری فراهم کرده است.

۳ - مروری بر تکنولوژی و کاربرد بسته بندی های نانو و هوشمند در ماندگاری مواد غذایی



تصویر (۳) کاربرد بسته بندی های نانو و هوشمند در ماندگاری مواد غذایی



(۳-۱) معرفی فناوری نانو در صنایع غذایی

فناوری نانو به مطالعه، تولید و به کارگیری مواد در مقیاس نانومتر (معمولاً ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) می‌پردازد. در این ابعاد، نسبت سطح به حجم مواد بسیار بالا بوده و خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی منحصر به فردی ایجاد می‌شود که در ابعاد ماکرو مشاهده نمی‌گردد.

در حوزه صنایع غذایی، نانوفناوری از مراحل تولید مواد خام تا فرآیند بسته‌بندی نقش مؤثری ایفا می‌کند. به کارگیری نانوذرات در ترکیب مواد بسته‌بندی موجب بهبود خواص مکانیکی، افزایش مقاومت در برابر نفوذ گازها و رطوبت، و در نتیجه افزایش عمر ماندگاری محصول می‌شود. این فناوری همچنین امکان کنترل آزادسازی مواد نگهدارنده یا آنتی‌میکروبی را فراهم می‌سازد که از رشد میکروارگانیسم‌ها جلوگیری می‌کند. [۴۵]

(۳-۲) بسته‌بندی نانویی و ویژگی‌های فنی آن

بسته‌بندی یکی از عناصر حیاتی در زنجیره تأمین مواد غذایی است. بسته‌بندی مناسب باید علاوه بر محافظت فیزیکی از محصول، مانع نفوذ اکسیژن، بخار آب، نور و سایر عوامل تخریب‌کننده شود. در بسته‌بندی نانویی، نانوذراتی مانند نانورس^{۲۹}، نقره نانو، اکسید تیتانیوم و نانوسیلیکا به پلیمرها افزوده می‌شوند تا خواص ممانعتی و مکانیکی را بهبود دهند.

به طور مثال، افزودن نانورس به پلیمرها موجب کاهش نفوذ گازها و رطوبت شده و باعث افزایش دوام بسته‌بندی در شرایط مختلف دمایی می‌گردد. همچنین، استفاده از نانوذرات نقره خاصیت ضدباکتریایی ایجاد می‌کند که می‌تواند در کاهش فساد و آلودگی میکروبی مؤثر باشد.

در برخی پژوهش‌ها، بسته‌بندی‌های نانویی در مقایسه با بسته‌بندی‌های معمولی توانسته‌اند تا دو برابر ماندگاری مواد غذایی را افزایش دهند. نمودارهای آزمایشی در این حوزه نشان می‌دهند که غلظت بهینه نانوذرات در پلیمرها تأثیر مستقیمی بر کاهش میزان اکسیژن نفوذی دارد (شکل توصیفی: منحنی کاهش نفوذ اکسیژن با افزایش درصد نانورس). [۴۶]

^{۲۹} (Nanoclay)



(۳-۳) بسته‌بندی هوشمند و نانوحسگر ها

بسته‌بندی هوشمند یکی از دستاوردهای برجسته نانوفناوری است که علاوه بر حفاظت از مواد غذایی، قادر به تشخیص وضعیت تازگی، آلودگی یا فساد ماده غذایی* است. در این نوع بسته‌بندی، از نانوحسگر هایی استفاده می‌شود که به تغییرات گازها، دما یا ترکیبات فرآر حاصل از فساد واکنش نشان داده و به صورت تغییر رنگ یا سیگنال الکترونیکی هشدار می‌دهند. به عنوان مثال، حسگر های مبتنی بر نانولوله های کربنی یا نقاط کوانتومی می‌توانند میزان دی‌اکسیدکربن یا آمونیاک منتشر شده از مواد غذایی را شناسایی کنند. برخی از این سیستم ها در قالب فیلم های پلاستیکی نیمه شفاف به کار گرفته می‌شوند و در صورت فساد، رنگ بسته‌بندی از بی‌رنگ به قرمز تغییر می‌کند. [۴۷]

(۳-۴) شرکت های فعال و کاربرد های صنعتی

در حال حاضر شرکت های بزرگ غذایی نظیر *Nestlé*، *Kraft Heinz*، و *Unilever* سرمایه‌گذاری قابل توجهی در زمینه توسعه بسته‌بندی های نانویی انجام داده‌اند. این شرکت ها در حال طراحی فیلم های چندلایه حاوی نانوذرات و حسگر های بیوشیمیایی هستند که می‌توانند به طور مستقیم با تغییر شرایط محیطی واکنش نشان دهند. به عنوان نمونه، پروژه های صنعتی با هدف توسعه فیلم های نانویی تجزیه‌پذیر در حال اجراست که ضمن حفظ ایمنی غذایی، اثرات زیست محیطی بسته‌بندی های پلاستیکی را کاهش می‌دهد. فناوری هایی مانند RFID (شناسایی فرکانس رادیویی) نیز با نانوحسگر ها تلفیق شده‌اند تا مسیر نگهداری و حمل‌ونقل غذا را پایش کنند. [۴۸]

(۳-۵) چالش ها و ملاحظات ایمنی

اگرچه بسته‌بندی نانویی و هوشمند مزایای متعددی دارد، اما نگرانی هایی در زمینه *ایمنی، سمیت و مهاجرت نانوذرات* به درون مواد غذایی وجود دارد. برخی مطالعات نشان داده‌اند که در صورت تماس طولانی مدت یا دمای بالا، احتمال مهاجرت برخی نانوذرات فلزی (مانند نقره یا اکسید روی) به داخل غذا وجود دارد. بنابراین انجام آزمایش های سم‌شناسی^{۳۰} و مطالعات مهاجرت نانوذرات^{۳۱} برای اطمینان از سلامت مصرف‌کنندگان ضروری است. سازمان های بین‌المللی مانند EFSA و FDA در حال تدوین دستورالعمل هایی برای ارزیابی ریسک نانومواد در بسته‌بندی غذایی هستند. [۴۹]

^{۳۰} Toxicology

^{۳۱} Migration studies



– فناوری نانو افق‌های جدیدی را در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی گشوده است. بسته‌بندی‌های هوشمند و نانویی با فراهم کردن حفاظت بهتر، قابلیت تشخیص فساد، و افزایش ماندگاری مواد غذایی، نقش بسزایی در بهبود کیفیت و ایمنی مواد خوراکی ایفا می‌کنند.

با این حال، برای کاربرد گسترده این فناوری در مقیاس صنعتی، انجام تحقیقات تکمیلی درباره اثرات زیست محیطی و ایمنی نانومواد ضروری است. آینده بسته‌بندی مواد غذایی به سوی سامانه‌های خودتنظیم^{۳۲}، زیست‌تخریب‌پذیر^{۳۳} و ایمن مبتنی بر نانوحسگرها در حرکت است. [۵۰]

۴ – استفاده از فناوری نانو در انتقال پروبیوتیک‌ها

(۴-۱) اهمیت پایداری و انتقال مؤثر پروبیوتیک‌ها

پروبیوتیک‌ها میکروارگانیسم‌های زنده‌ای هستند که در صورت مصرف به مقدار کافی، اثرات مثبتی بر سلامت میزبان دارند. برای دستیابی به این اثرات، باید این سلول‌ها در محصولات غذایی فعال مانده و در طول عبور از دستگاه گوارش، از جمله در برابر اسید معده، نمک صفراوی و آنزیم‌های گوارشی، مقاومت نشان دهند. یکی از چالش‌های عمده در کاربرد پروبیوتیک‌ها، زنده ماندن آن‌ها تا رسیدن به روده است. از این رو روش‌های مختلفی برای محافظت از این سلول‌ها از طریق (کپسوله‌سازی و نانوکپسوله‌سازی) توسعه یافته‌اند. [۵۱]

(۴-۲) کپسوله‌سازی و نقش آن در پایداری پروبیوتیک

کپسوله‌سازی، فرآیندی برای محصور کردن سلول‌های زنده درون لایه‌ای محافظ است تا از آن‌ها در برابر شرایط سخت محیطی محافظت کند. بسته به اندازه ذرات، این فرایند به دو دسته تقسیم می‌شود [۵۲]:

– میکروکپسوله‌سازی (اندازه ۸۰۰ تا ۳۰۰۰ میکرومتر)

– نانوکپسوله‌سازی (اندازه ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر)

^{۳۲} Self-regulating systems

^{۳۳} Biodegradable



روش های متنوعی از جمله اکستروژن^{۳۴} (خارج سازی)، امولسیون یونی، خشک کردن اسپری، ژل شدن یونی، و استفاده از مواد پلی ساکاریدی^{۳۵} و پروتئینی برای انجام این کار به کار می روند [۵۳].



تصویر (۲-۴) روش های مختلف کپسوله کردن پروبیوتیک (a) کپسوله کردن فله ای (b) نانو کپسوله سازی

(۳-۴) مواد پلیمری و زیستی در نانو کپسوله سازی

مواد پلیمری زیستی مانند آلژینات^{۳۶}، کیتوسان^{۳۷}، پلی وینیل الکل^{۳۸} و اینولین^{۳۹} به عنوان دیواره های محافظ استفاده می شوند. به طور خاص، (آلژینات) یک پلی ساکارید طبیعی استخراج شده از جلبک است که با یون های کلسیم ساختار ژل ماندنی ایجاد کرده و از سلول های پروبیوتیک در برابر اسید معده محافظت می کند. [۵۴] (کیتوسان) نیز با بار مثبت خود در تعامل با آلژینات، غشایی متراکم تر و نفوذ ناپذیرتر به وجود می آورد که باعث افزایش مقاومت کپسول ها در برابر انحلال می شود. [۵۵]

^{۳۴} Extrusion

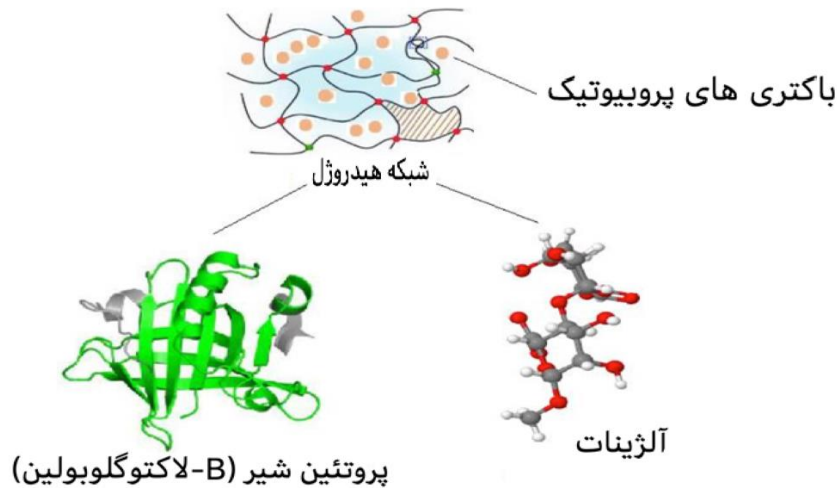
^{۳۵} Polysaccharide

^{۳۶} Alginate

^{۳۷} chitosan

^{۳۸} polyvinyl alcohol

^{۳۹} inulin



تصویر (۳-۴) انواع کپسوله سازی فله ای پروبیوتیک ها

(۴-۴) استفاده از پروتئین ها در ساخت کپسول ها

پروتئین های طبیعی مانند (کازئین^{۴۰}، ژلاتین، وی و سویا) به عنوان ماتریس های ژل ساز برای محصور کردن سلول های زنده مورد استفاده قرار می گیرند. [۵۶]

پروتئین ها به دلیل توانایی تشکیل شبکه های سه بعدی، به حفظ رطوبت و مقاومت در برابر شرایط معده کمک می کنند. [۵۷]
در پژوهش ها، ژل های کازئین با کمک آنزیم ترانس گلوتامیناز^{۴۱} برای کپسوله سازی پروبیوتیک ها مورد استفاده قرار گرفته اند. [۵۸]

(۴-۵) توسعه سیستم های هیدروژلی و کمپلکس های یونی

در ترکیب پلی ساکارید ها و پلی کاتیون ها، کمپلکس های یونی تشکیل می شود که ساختار مستحکمی را برای حفاظت سلول ها فراهم می سازد. [۵۹] [۶۰]

^{۴۰} Casein

^{۴۱} Transglutaminase



کپسول های ساخته شده از آلژینات و پلی-لیزین^{۴۲} به دلیل بارهای مخالف، شبکه‌ای نیمه تراوا می‌سازند که نفوذ مواد مضر را محدود و آزادسازی سلول در روده را تسهیل می‌کند. [۶۱]

(۴-۶) نانوکپسوله سازی الهام گرفته از طبیعت^{۴۳}

برخی باکتری ها مانند (*Bacillus subtilis*) به طور طبیعی توانایی تولید اسپور^{۴۴} مقاوم دارند. دانشمندان با الهام از این ویژگی، روشی موسوم به (کپسوله سازی تقلید از طبیعت^{۴۵}) توسعه داده‌اند. [۶۲] [۶۳]
در این روش، از مواد مختلفی نظیر (سیلیکا، گرافن، چارچوب های فلزی-آلی^{۴۶}) و (شبکه های فلزی-فنولی)^{۴۷} برای پوشش سلول های منفرد استفاده می‌شود. [۶۴] این پوشش ها مقاومت سلول را در برابر حرارت، تابش و تنش های اکسیداتیو افزایش می‌دهند. [۶۵]

(۴-۷) روش لایه به لایه^{۴۸}

یکی از روش های مهم نانوکپسوله سازی، (مونتاژ لایه به لایه^{۴۹}) است. در این روش، لایه هایی از پلی الکترولیت های با بار مثبت و منفی به صورت متناوب روی سطح سلول رسوب داده می‌شوند [۶۶]. [۶۷]
نتیجه این کار تشکیل غشایی کنترل شده و یکنواخت است که مقاومت مکانیکی و شیمیایی بالایی دارد. [۶۸]

(۴-۸) خودآرایی و غشا های زیستی مصنوعی

فرایند (خودآرایی^{۵۰}) به مولکول ها اجازه می‌دهد تا به صورت خود به خود ساختار هایی منظم و پایداری تشکیل دهند.
این مفهوم در طراحی پوشش های نانویی برای سلول های پروبیوتیک استفاده شده است. [۶۹]

^{۴۲} Poly-L-lysine

^{۴۳} Biomimetic

^{۴۴} Spore/Endospore

^{۴۵} Biomimetic Encapsulation

^{۴۶} MOF

^{۴۷} MPN

^{۴۸} Layer-by-Layer

^{۴۹} LbL

^{۵۰} Self-Assembly



به طور خاص، پوشش های غشایی مبتنی بر لیپید و فسفولیپید) که از غشای طبیعی سلول های باکتری یا گلبول قرمز الهام گرفته‌اند، موجب افزایش پایداری پروبیوتیک ها در شرایط اسیدی و صفراوی می‌شوند. [۷۰]

(۹-۴) شبکه های فلزی-فنولی و کاربرد آن‌ها

ساختارهای MPN از واکنش ترکیبات فنولی (مانند تانن ها) با یون های فلزی سه ظرفیتی مثل Fe^{3+} تشکیل می‌شوند. این شبکه ها به‌عنوان نانو پوشش های قابل تنظیم برای سلول های پروبیوتیک استفاده شده‌اند که ضمن حفظ فعالیت سلول، امکان آزادسازی تدریجی در روده را فراهم می‌کنند. [۷۱]

در پژوهش سال ۲۰۲۳، پوشش دولایه TA/FeIII-L100 توانست بقای باکتری E. coli Nissle ۱۹۱۷ را در شرایط اسیدی به طور قابل توجهی افزایش دهد. [۷۲]

(۱۰-۴) ارتباط فناوری نانو با صنایع غذایی و نقش آن در انتقال پروبیوتیک ها

کاربرد فناوری نانو در صنایع غذایی طی دو دهه گذشته از یک حوزه تحقیقاتی نوظهور به یکی از بخش های استراتژیک توسعه در صنایع غذایی مدرن تبدیل شده است. در این میان، (نانوکپسوله سازی پروبیوتیک ها) یکی از ملموس ترین و مهم ترین کاربردهای نانو در این صنعت است. [۷۳]

(۱۰-۴-۱) چالش های سنتی در نگهداری پروبیوتیک ها

پروبیوتیک ها در محصولات غذایی به شدت در معرض *تخریب حرارتی، اکسیداتیو، و شیمیایی* هستند. دماهای بالا در فرایند هایی مانند پاستوریزه کردن، خشک کردن یا پخت، موجب مرگ سلول های زنده می‌شود. همچنین، حضور اکسیژن، اسید و نمک صفراوی درون محصول یا در بدن، زنده ماننی باکتری ها را کاهش می‌دهد.

در محصولات لبنی مانند ماست، دوغ یا پنیر، زنده ماندن سلول های پروبیوتیک تا پایان زمان نگهداری، یکی از مهم ترین معیارهای کیفیت است. [۷۳]

فناوری نانو با ایجاد پوشش های نانو مقیاس و ماتریس های چندلایه، توانسته است این مشکلات را تا حد زیادی برطرف کند. نانوذرات با اندازه‌های بین ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر، نسبت سطح به حجم بالایی دارند و می‌توانند سلول های حساس را درون خود محصور کرده و از تماس مستقیم آن‌ها با عوامل مضر جلوگیری کنند.



(۲-۱۰-۴) نقش فناوری نانو در افزایش ماندگاری مواد غذایی حاوی پروبیوتیک

فناوری نانو با ایجاد ساختارهای محافظ در مقیاس مولکولی، سبب افزایش پایداری محصولات غذایی می‌شود. به عنوان مثال، در محصولات لبنی و نوشیدنی های پروبیوتیک، استفاده از نانوذرات آلژینات-کیتوسان یا سیلیکا موجب افزایش مقاومت سلول‌ها در برابر دمای بالا و pH پایین شده است.

در شکلات‌ها، دسر ها و غلات صبحانه نیز نانوکپسوله سازی به حفظ فعالیت پروبیوتیک ها در طی نگهداری طولانی مدت کمک می‌کند.

در پژوهش های صنعتی گزارش شده که محصولات نانوکپسوله شده تا ۲ تا ۳ برابر ماندگاری بیشتر نسبت به نمونه های معمولی داشته اند. این امر نه تنها به بهبود کیفیت محصول کمک می‌کند، بلکه موجب افزایش ایمنی میکروبی و کاهش نیاز به نگهدارند ه های شیمیایی نیز می‌شود.

(۳-۱۰-۴) کاربردهای صنعتی نانوکپسوله سازی در فرآورده های غذایی

در حال حاضر، شرکت های تولیدکننده مواد غذایی از فناوری نانو برای اهداف زیر استفاده می‌کنند:

نوشیدنی های عملکردی و لبنیات: به کارگیری نانوکپسول های حاوی *Lactobacillus* یا *Bifidobacterium* در دوغ و شیرهای تخمیری برای افزایش ماندگاری.

فرآورده های گوشتی: استفاده از نانو پوشش های ضدباکتریایی مانند نانوذرات نقره یا روی برای جلوگیری از فساد میکروبی. دسر ها و شکلات ها: ترکیب نانوذرات لیپیدی و پلیمر های زیست تخریب پذیر برای حفظ عطر، طعم و سلامت باکتری های زنده. محصولات خشک و غلات صبحانه: پوشش دهی پروبیوتیک ها با نانو لایه های محافظ برای مقاومت در برابر رطوبت و دمای بالا. محصولات نوشیدنی غیر دارویی: مانند آبمیوه های غنی شده با باکتری های مقاوم در برابر اسید معده .

این کاربرد ها نشان می‌دهد که نانوفناوری توانسته است مرز بین سلامت، کیفیت و فناوری بسته بندی را در صنایع غذایی به صورت چشمگیری جا به جا کند.



(۴-۱۰-۴) فناوری نانو در طراحی بسته بندی های هوشمند و زیست فعال

یکی از توسعه های اخیر در صنایع غذایی، ترکیب فناوری نانو با بسته بندی های فعال و هوشمند است. در این روش ها از نانوذرات در فیلم های پلیمری استفاده می شود تا:

- گازها (اکسیژن، دی اکسید کربن، بخار آب) را کنترل کنند؛
- رشد میکروارگانیسم های فاسدکننده را مهار نمایند؛
- و وضعیت تازگی یا فساد غذا را از طریق تغییر رنگ یا هدایت الکتریکی نشان دهند.

به عنوان مثال، بسته بندی های حاوی نانوذرات نقره و تیتانیوم دی اکسید، خاصیت ضدباکتریایی قابل توجهی دارند، در حالی که نانوحسگر های زیستی در فیلم های پلیمر-نانو، قادر به تشخیص فساد غذا از طریق ترکیبات فرار هستند.

این فناوری ها در کنار نانوکپسوله سازی، چرخه ای ایمنی غذا را از تولید تا مصرف بهبود می بخشند.

(۴-۱۰-۵) مزایای اقتصادی و زیست محیطی

به کار گیری فناوری نانو در صنایع غذایی، علاوه بر بهبود کیفیت، صرفه جویی اقتصادی و کاهش ضایعات غذایی را نیز به دنبال دارد. پروبیوتیک های نانوکپسوله شده نیاز به افزودن نگهدارنده های شیمیایی را کاهش داده و ماندگاری طبیعی محصول را افزایش می دهند. همچنین مواد نانوپوشش دهنده زیست تخریب پذیر (مانند آلژینات و کیتوسان) باعث کاهش آلودگی پلاستیکی و اثرات زیست محیطی بسته بندی های متداول می شوند. در صنایع لبنی و نوشیدنی، استفاده از فناوری نانو سبب افزایش راندمان تولید و کاهش اتلاف انرژی نیز شده است. بسیاری از کارخانه ها در حال توسعه خطوط تولید مجهز به سیستم های نانوکپسوله سازی مایع هستند که قابلیت پیوسته سازی فرآیند را دارند.

(۴-۱۰-۶) چالش ها و آینده ی فناوری نانو در صنایع غذایی

با وجود مزایای بسیار، چند مانع اساسی برای گسترش کاربرد نانو در صنایع غذایی وجود دارد:

- نگرانی های ایمنی در خصوص مهاجرت نانوذرات به داخل مواد غذایی و اثرات بلند مدت آن ها بر سلامت انسان؛
- نبود قوانین جامع بین المللی برای ارزیابی و کنترل نانومواد در زنجیره غذایی؛
- هزینه بالای تولید و تجهیزات نانوکپسوله سازی در مقیاس صنعتی.



با این حال، روند پژوهش‌ها نشان می‌دهد که با توسعه‌ی مواد نانو پوشش دهنده زیست سازگار و اصلاح روش‌های فرآیندی، در آینده نزدیک، استفاده از نانو پروبیوتیک‌ها در مواد غذایی عملکردی، نوشیدنی‌ها و مکمل‌های تغذیه‌ای به استاندارد صنعتی تبدیل خواهد شد. فناوری نانو در صنایع غذایی دیگر صرفاً یک ابزار آزمایشگاهی نیست، بلکه به یک فناوری کلیدی برای ارتقای سلامت عمومی، بهبود کیفیت محصولات، و افزایش ماندگاری پروبیوتیک‌ها بدل شده است. ترکیب این فناوری با علوم زیستی و مهندسی مواد، چشم‌اندازی روشن از تولید غذاهای هوشمند، ایمن و عملکردی را ترسیم می‌کند.

– نتایج مربوط به انواع مواد، روش‌ها و محصولات حاوی پروبیوتیک نانوکپسوله بدین شرح است:

– *Bifidobacterium lactis* در دوغ با استفاده از آلژینات و اینولین کپسوله شده است.

– *Lactobacillus rhamnosu* در فیله ماهی با پلی‌وینیل‌الکل پوشش یافته است.

– *Bacillus coagulans* در آبمیوه با استفاده از روش لایه به لایه و مواد آلژینات-کیتوسان محافظت شده است. [۷۴]

این داده‌ها نشان می‌دهد که نانوکپسوله‌سازی موجب افزایش بقاء سلول‌ها در مواد غذایی مختلف می‌شود. [۷۵]

– فناوری نانو در انتقال پروبیوتیک‌ها، راهکارهای نوینی برای افزایش بقاء، کارایی، و اثرگذاری این میکروارگانیسم‌ها فراهم آورده است.

محصول غذایی	روش کپسوله سازی	متریال	جزء کپسوله شده
دوغ	emulsification extrusion	سدیم آلژینات/اینولین/گلیسرول	<i>bifidobacterium animalis subsp. lactis</i>
شیر بز	–	فسفاتیدیل کولین	Bacteriocins
گوشت گاو	–	آلژینات /کیتوسان	<i>nisin</i>
فیله ماهی قزل‌آلای رنگین کمان	–	پلی وینیل الکل/سدیم آلژینات	<i>Lactobacillus rhamnosus</i>
فیله ماهی قزل‌آلای رنگین کمان	electrospinning	–	<i>Lactobacillus reuteri</i>
شکلات، آبنبات	–	–	<i>Lactobacillus plantarum</i>
آبمیوه	Layer by layer (LbL)	آلژینات/کیتوسان	<i>Bacillus coagulans BC</i>

تصویر (۴) نانو کپسولاسیون پروبیوتیک‌ها.



روش‌هایی مانند نانوکپسوله سازی تک‌سلولی، پوشش‌های زیستی الهام گرفته از طبیعت و شبکه‌های فلزی-فنولی چشم‌اندازهای گسترده‌ای برای تولید مکمل‌ها و مواد غذایی عملکردی باز کرده‌اند. با وجود این پیشرفت‌ها، نیاز به مطالعات بیشتر درباره ایمنی، زیست‌سازگاری و بهینه‌سازی رهایش کنترل‌شده همچنان باقی است. [۷۶]

نتیجه‌گیری نهایی

فناوری نانو به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین شاخه‌های علم نوین، نقش بسزایی در توسعه و ارتقای کیفیت غذاهای کاربردی و سیستم‌های انتقال ترکیبات زیست‌فعال ایفا کرده است. بهره‌گیری از نانوحامل‌ها، نانوامولسیون‌ها، نانوکپسول‌ها و نانوذرات فلزی یا پلیمری موجب افزایش پایداری، قابلیت جذب، زیست‌دسترسی و رهایش کنترل‌شده ترکیبات فعال زیستی از جمله ویتامین‌ها، پلی‌فنول‌ها، کاروتنوئیدها و اسیدهای چرب ضروری شده است. این فناوری امکان انتقال هدفمند ترکیبات را به بافت‌ها و اندام‌های خاص فراهم کرده و بدین وسیله کارایی بیولوژیک آن‌ها را به‌طور چشمگیری ارتقا می‌دهد. [۷۷]

با این وجود، نگرانی‌هایی در خصوص سمیت احتمالی نانوذرات، تجمع زیستی در بافت‌های بدن، پایداری در محیط زیست و اثرات بلند مدت مصرف این ترکیبات مطرح است. بنابراین، انجام پژوهش‌های گسترده در زمینه ارزیابی ایمنی نانومواد، استانداردسازی روش‌های سنتز و تعیین حدود مجاز مصرف در مواد غذایی ضرورت دارد. [۷۸]

در مجموع، ادغام دانش نانوفناوری با علوم زیستی، فناوری مواد و صنایع غذایی، افق‌های نوینی را در تولید غذاهای عملکردی نسل آینده می‌گشاید؛ غذاهایی که علاوه بر ارزش تغذیه‌ای بالا، می‌توانند در پیشگیری از بیماری‌ها و ارتقای سلامت جامعه نقش مؤثری ایفا کنند. [۷۹]



مزایا

مزایا [۸۰]

- ۱- افزایش پایداری ترکیبات زیست فعال در برابر تخریب ناشی از نور، حرارت و اکسیداسیون.
- ۲- بهبود زیست دسترسی و فراهم بودن زیستی ترکیبات حساس در بدن.
- ۳- رهایش کنترل شده و هدفمند ترکیبات در نواحی خاص دستگاه گوارش.
- ۴- بهبود ویژگی های فیزیکی و حسی مواد غذایی شامل طعم، بافت و رنگ.
- ۵- افزایش ماندگاری محصولات غذایی از طریق بسته بندی های نانویی و فیلم های زیست فعال.
- ۶- امکان حمل و حفاظت از ترکیبات حساس زیستی مانند پروبیوتیک ها، آنزیم ها و ویتامین ها.

معایب و محدودیت ها

معایب [۸۱]

- ۱- احتمال سمیت و تجمع نانوذرات در اندام های بدن مانند کبد، کلیه و مغز.
- ۲- نبود استانداردها و دستورالعمل های مشخص ایمنی برای کاربرد نانومواد در صنایع غذایی.
- ۳- پیچیدگی ارزیابی رفتار نانوذرات در بدن به دلیل تفاوت در اندازه، شکل و بار سطحی.
- ۴- ریسک نفوذ ناخواسته نانومواد به بافت ها و ایجاد اثرات آلرژیک یا التهابی.
- ۵- ابهام در پذیرش اجتماعی و اعتماد مصرف کنندگان نسبت به محصولات حاوی نانوذرات.



فهرست منابع

- [۱] "Bhushan, B. (Ed.). (۲۰۲۳). Springer Handbook of Nanotechnology (۵th ed.). Springer .".
- [۲] "Rai, M & ,Ingle, A. P. (۲۰۲۱). Nanotechnology in Food and Agriculture: Recent Developments and Future Prospects. Elsevier .".
- [۳] "Zhang, Y & ,Chen, Y. (۲۰۲۲). "Nanostructures for food packaging and preservation: Advances and perspectives." Food Hydrocolloids, ۱۳۳, ۱۰۷۹۹۲ .".
- [۴] "Singh, T., Shukla, S., Kumar, P., Wahla, V., Bajpai, V. K & ,Rather, I. A. (۲۰۲۱). "Application of nanotechnology in food science: perception and overview." Frontiers in Microbiology, ۱۲, ۶۵۲ .".
- [۵] "Espitia, P. J. P., Soares, N. F. F & ,McHugh, T. H. (۲۰۲۰). "Nanostructured materials for food packaging applications." Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, ۱۹(۶), ۲۹۹۳-۳۰۱۸ .".
- [۶] "Khan, I., Saeed, K & ,Khan, I. (۲۰۱۹). "Nanoparticles: Properties, applications and toxicities." Arabian Journal of Chemistry, ۱۲(۷), ۹۰۸-۹۳۱ .".
- [۷] .۷"Kumar, R & ,Rani, S. (۲۰۲۲). "Zinc oxide nanoparticles: Synthesis, characterization and biomedical applications." Materials Today: Proceedings, ۵۸, ۱۲۰۳-۱۲۱۱ .".
- [۸] "Li, M & ,Almasi, H. (۲۰۲۰). "Smart nanocomposite films for food packaging applications: A review." Food Packaging and Shelf Life, ۲۵, ۱۰۰۵۲۳ .".
- [۹] .۹"Das, S., Debnath, N & ,Mitra, S. (۲۰۲۱). "Nanotechnology in probiotics delivery: An emerging approach for gut health." Critical Reviews in Food Science and Nutrition, ۶۱(۱۸), ۳۰۲۰-۳۰۳۸ .".
- [۱۰] .۱۰"Fadeel, B & ,Pietroiusti, A. (۲۰۲۲). Safety Assessment of Nanomaterials: Principles and Practices. Academic Press .".
- [۱۱] "Hasan, S. (۲۰۱۵). A Review on Nanoparticles: Their Synthesis and Types. Research Journal of Recent Sciences, ۴(ISC-۲۰۱۴), ۹-۱۱ .".
- [۱۲] "Hasan, S. (۲۰۱۵). A Review on Nanoparticles: Their Synthesis and Types. Research Journal of Recent Sciences, ۴(ISC-۲۰۱۴), ۹-۱۱ .".



- [۱۳] "Ramrakhiani, M. (۲۰۱۲). Nanostructures and their applications. Recent Research in Science and Technology, ۴(۸), ۱۴-۱۹." - بخش خواص و طبقه‌بندی.
- [۱۴] "Ramrakhiani, M. (۲۰۱۲). Nanostructures and their applications. Recent Research in Science and Technology, ۴(۸), ۱۴-۱۹." - بخش خواص و طبقه‌بندی.
- [۱۵] "Ramrakhiani, M. (۲۰۱۲). Nanostructures and their applications. Recent Research in Science and Technology, ۴(۸), ۱۴-۱۹."
- [۱۶] "Ramrakhiani, M. (۲۰۱۲). Nanostructures and their applications. Recent Research in Science and Technology, ۴(۸), ۱۴-۱۹."
- [۱۷] "Ramrakhiani, M. (۲۰۱۲). Nanostructures and their applications. Recent Research in Science and Technology, ۴(۸), ۱۴-۱۹."
- [۱۸] "Ramrakhiani, M. (۲۰۱۲). Nanostructures and their applications. Recent Research in Science and Technology, ۴(۸), ۱۴-۱۹."
- [۱۹] "Hasan, S. (۲۰۱۵). A Review on Nanoparticles: Their Synthesis and Types. Research Journal of Recent Sciences, ۴(ISC-۲۰۱۴), ۹-۱۱."
- [۲۰] "(۲۰۱۲)"Nanostructures and their applications. Recent Research in Science and Technology, ۴(۸), ۱۴-۱۹."
- [۲۱] "(۲۰۱۲)"Nanostructures and their applications. Recent Research in Science and Technology, ۴(۸), ۱۴-۱۹."
- [۲۲] ".(۲۰۱۵)"A Review on Nanoparticles: Their Synthesis and Types. Research Journal of Recent Sciences, ۴(ISC-۲۰۱۴), ۹-۱۱."
- [۲۳] "Research Journal of Recent Sciences, Vol. ۴(ISC-۲۰۱۴), ۹-۱۱ (۲۰۱۵)." (
- [۲۴] "Research Journal of Recent Sciences, Vol. ۴(ISC-۲۰۱۴), ۹-۱۱ (۲۰۱۵)." (
- [۲۵] "Research Journal of Recent Sciences, Vol. ۴(ISC-۲۰۱۴), ۹-۱۱ (۲۰۱۵)." (
- [۲۶] "Research Journal of Recent Sciences, Vol. ۴(ISC-۲۰۱۴), ۹-۱۱ (۲۰۱۵)." (
- [۲۷] "Research Journal of Recent Sciences, Vol. ۴(ISC-۲۰۱۴), ۹-۱۱ (۲۰۱۵)." (
- [۲۸] "Recent Research in Science and Technology ۲۰۱۲, ۴(۸), p. . بخش نانومواد خاص."
- [۲۹] "Recent Research in Science and Technology ۲۰۱۲, ۴(۸): ۱۴-۱۹, p. . بخش نانومواد خاص."
- [۳۰] "Recent Research in Science and Technology ۲۰۱۲, ۴(۸): ۱۴-۱۹."
- [۳۱] "Recent Research in Science and Technology ۲۰۱۲, ۴(۸): ۱۴-۱۹."



- [۳۲] "Recent Research in Science and Technology ۲۰۱۲, ۴(۸): ۱۴-۱۹."
- [۳۳] "Recent Research in Science and Technology ۲۰۱۲, ۴(۸)." (
- [۳۴] "M. (۲۰۱۲). Nanostructures and their applications. Recent Research in Science and Technology, ۴(۸), ۱۴-۱۹."
- [۳۵] "M. (۲۰۱۲). Nanostructures and their applications. Recent Research in Science and Technology, ۴(۸), ۱۴-۱۹."
- [۳۶] <"Soltani L, Mohammadi T. An overview of the applications of zinc oxide nanoparticles in the biological sciences* < Journal of Cell and Tissue.* ۲۰۲۲;۱۳(۳):۲۱۵-۲۳۴."
- [۳۷] <"Soltani L, Mohammadi T. An overview of the applications of zinc oxide nanoparticles in the biological sciences* < Journal of Cell and Tissue.* ۲۰۲۲;۱۳(۳):۲۱۵-۲۳۴."
- [۳۸] "An overview of the applications of zinc oxide nanoparticles in the biological sciences."
- [۳۹] "An overview of the applications of zinc oxide nanoparticles in the biological sciences."
- [۴۰] *"Journal of Cell and Tissue."
- [۴۱] "Soltani L, Mohammadi T. An overview of the applications of zinc oxide nanoparticles in the biological sciences."
- [۴۲] <"An overview of the applications of zinc oxide nanoparticles in the biological sciences* < Journal of Cell and Tissue."*.
- [۴۳] "Journal of Cell and Tissue.* ۲۰۲۲."
- [۴۴] "An overview of the applications of zinc oxide nanoparticles in the biological sciences."
- [۴۵] "Velayatzadeh, M. (۲۰۲۳). An overview of the technology and application of nano and smart packaging in the shelf life of food. RSENS, Vol. ۲, Issue ۱, pp. ۱۵-۲۵."
- [۴۶] "Nestlé, Kraft Heinz, Unilever – Industrial Reports on Nano Packaging Materials."
- [۴۷] "EFSA & FDA (۲۰۲۳). Guidelines on nanomaterial safety assessment in food packaging."
- [۴۸] "R. Qureshi et al. (۲۰۲۲). Nanoclay-reinforced polymers in food packaging: A review."
- [۴۹] "Sustainpack Project (EU, ۲۰۲۰). Smart and Sustainable Nanopackaging."



- [۵۰] "Various figures and tables adapted and described from pages ۱۶–۲۵ of the original RSENS article .".
- [۵۱] "Minelli, E. B & ,Benini, A. (۲۰۰۸). Relationship between number of bacteria and their probiotic effects. Microbial Ecology in Health and Disease ."
- [۵۲] "Reque, P. M & ,Brandelli, A. (۲۰۲۱). Encapsulation of probiotics and nutraceuticals: Applications in functional food industry. Trends in Food Science & Technology ."
- [۵۳] "Centurion F, Basit AW, Liu J, Gaisford S, Rahim MA, Kalantar-Zadeh K. Nanoencapsulation for probiotic delivery. ACS nano."
- [۵۴] H. Liu ,M. Xie ,S. R. t. a. a. o. p. f. m. o. p. F. F. ۲. ۱. ۴.–۵. ۱. M. A. Nie ,S. H. Razavi ,M. R. Ehsani و S. P. a. m. o. m.–c. Sohrabvandi .
- [۵۵] "Razavi, S.; Janfaza, S.; Tasnim, N.; Gibson, D. L.; Hoorfar, M., Microencapsulating polymers for probiotics delivery systems: Preparation, characterization, and applications. Food Hydrocolloids ۲۰۲۱, ۱۲۰, ۱۰۶۸۸۲ .".
- [۵۶] "Abd El-Salam, M. H.; El-Shibiny, S., Preparation and properties of milk proteins-based encapsulated probiotics: a review. Dairy Science & Technology ۲۰۱۵ ."
- [۵۷] "Augustin, M. A.; Oliver, C. M., Chapter ۱۹ – Use of Milk Proteins for Encapsulation of Food Ingredients. In Microencapsulation in the Food Industry, Gaonkar, A. G.; Vasisht, N.; Khare, A. R.; Sobel, R., Eds. Academic Press: San Diego, ۲۰۱۴ ."
- [۵۸] "Heidebach, T.; Först, P.; Kulozik, U., Transglutaminase-induced caseinate gelation for the microencapsulation of probiotic cells. International Dairy Journal ۲۰۰۹ ."
- [۵۹] "Kwiecień, I.; Kwiecień, M., Application of Polysaccharide-Based Hydrogels as Probiotic Delivery Systems. Gels (Basel, Switzerland) ۲۰۱۸ ."
- [۶۰] "Clayton, H. A.; London, N. J. M.; Colloby, P. S.; Bell, P. R. F.; James, R. F. L., The effect of capsule composition on the biocompatibility of alginate-poly-L-lysine capsules. Journal of Microencapsulation ۱۹۹۱ ."
- [۶۱] "King, A.; Strand, B.; Rokstad, A.-M.; Kulseng, B.; Andersson, A.; Skjåk-Bræk, G.; Sandler, S., Improvement of the biocompatibility of alginate/poly-L-lysine/alginate microcapsules by the use of epimerized alginate as a coating. Journal of Biomedical Materials ۲۰۰۸ ."
- [۶۲] "de Hoon, M. J. L.; Eichenberger, P.; Vitkup, D., Hierarchical evolution of the bacterial sporulation network. Current biology: CB ۲۰۱۰ ."



- [۶۳] "Yang, S. H.; Lee, K.-B.; Kong, B.; Kim, J.-H.; Kim, H.-S.; Choi, I. S., Biomimetic Encapsulation of Individual Cells with Silica. *Angewandte Chemie International Edition* ۲۰۰۹."
- [۶۴] "Kempaiah, R.; Salgado, S.; Chung, W. L.; Maheshwari, V., Graphene as membrane for encapsulation of yeast cells: protective and electrically conducting. *Chemical Communications* ۲۰۱۱."
- [۶۵] "Yang, S. H.; Kang, S. M.; Lee, K.-B.; Chung, T. D.; Lee, H.; Choi, I. S., Mussel-Inspired Encapsulation and Functionalization of Individual Yeast Cells. *Journal of the American Chemical Society* ۲۰۱۱."
- [۶۶] "Donath, E.; Walther, D.; Shilov, V. N.; Knippel, E.; Budde, A.; Lowack, K.; Helm, C. A.; Möhwald, H., Nonlinear Hairy Layer Theory of Electrophoretic Fingerprinting Applied to Consecutive Layer by Layer Polyelectrolyte."
- [۶۷] "Iler, R. K., Multilayers of colloidal particles. *Journal of Colloid and Interface Science* ۱۹۶۶."
- [۶۸] "Anselmo, A. C.; McHugh, K. J.; Webster, J.; Langer, R.; Jaklenec, A., Layer-by-Layer Encapsulation of Probiotics for Delivery to the Microbiome. *Advanced Materials* ۲۰۱۶."
- [۶۹] "Wang, X.; Cao, Z.; Zhang, M.; Meng, L.; Ming, Z.; Liu, J., Bioinspired oral delivery of gut microbiota by self-coating with biofilms. *Science Advances* ۲۰۲۰."
- [۷۰] "Cao, Z.; Cheng, S.; Wang, X.; Pang, Y.; Liu, J., Camouflaging bacteria by wrapping with cell membranes. *Nature Communications* ۲۰۱۹."
- [۷۱] "Liu, J.; Li, W.; Wang, Y.; Ding, Y.; Lee, A.; Hu, Q., Biomaterials coating for on-demand bacteria delivery: Selective release, adhesion, and detachment. *Nano Today* ۲۰۲۱, ۴۱, ۱۰۱۲۹۱. ۳۷. That, L. F. L. N., Kyereh, E., Ansah, F. A & Pandohee, J. (۲۰۲۳)."
- [۷۲] "That, L. F. L. N., Kyereh, E., Ansah, F. A & Pandohee, J. (۲۰۲۳). Nanoencapsulated Probiotics and Prebiotics. *Handbook of Nanoencapsulation: Preparation, Characterization, Delivery, and Safety of Nutraceutical Nanocomposites*."
- [۷۳] "Ejima, H.; Richardson, J. J.; Liang, K.; Best, J. P.; van Koeveerden, M. P.; Such, G. K.; Cui, J.; Caruso, F., One-step assembly of coordination complexes for versatile film and particle engineering. *Science* ۲۰۱۳."



- [۷۴] "Gold nanoparticles conjugated L-lysine for improving cisplatin delivery to human breast cancer cells." *Current Drug Delivery* ۱۸.۶ (۲۰۲۱)."
- [۷۵] "Yin, W.; Wang, Y.; Liu, L.; He, J., Biofilms: The Microbial "Protective Clothing" in Extreme Environ-ments. *International journal of molecular sciences* ۲۰۱۹."
- [۷۶] "Castillo, N. A.; de LeBlanc, A. d. M.; Galdeano, C. M.; Perdigon, G., Probiotics: an alternative strategy for combating salmonellosis."
- [۷۷] "Sanguansri, P & ,Augustin, M. A. (۲۰۰۶). Nanoscale materials development—A food industry perspective. *Trends in Food Science & Technology*."
- [۷۸] "McClements, D. J. (۲۰۱۲). Nanoemulsions as potential delivery systems for bioactive components in foods. *Food Science and Nutrition*."
- [۷۹] "Weir, A., Westerhoff, P., Fabricius, L., Hristovski, K & ,von Goetz, N. (۲۰۱۲). Titanium dioxide nanoparticles in food and personal care products. *Environmental Science & Technology*."
- [۸۰] "Chen, H., Weiss, J & ,Shahidi, F. (۲۰۰۶). Nanotechnology in nutraceuticals and functional foods. *Food Technology*."
- [۸۱] "Sozer, N & ,Kokini, J. L. (۲۰۰۹). The applications of nanotechnology in food industry. *Trends in Biotechnology*."
- [۸۲] J. T. P. & .M. D. J. (. F. m. i. f. n. J. o. F. S. Y. R. Weiss .
- [۸۳] J. T. P. & .M. D. J. (. F. m. i. f. n. J. o. F. S. Y. R. Weiss.
- [۸۴] "Weiss, J., Takhistov, P & ,McClements, D. J. (۲۰۰۶). Functional materials in food nanotechnology. *Journal of Food Science*, ۷۱(۹), R۱۰۷–R۱۱۶."
- [۸۵] "Weiss, J., Takhistov, P & ,McClements, D. J. (۲۰۰۶). Functional materials in food nanotechnology. *Journal of Food Science*, ۷۱(۹), R۱۰۷–R۱۱۶."
- [۸۶] [۱]"Weiss, J., Takhistov, P & ,McClements, D. J. (۲۰۰۶). Functional materials in food nanotechnology. *Journal of Food Science*, ۷۱(۹), R۱۰۷–R۱۱۶."
- [۸۷] "[۱]Weiss, J., Takhistov, P., & McClements, D. J. (۲۰۰۶). Functional materials in food nanotechnology. *Journal of Food Science*, ۷۱(۹), R۱۰۷–R۱۱۶."
- [۸۸] "Weiss, J., Takhistov, P & ,McClements, D. J. (۲۰۰۶). Functional materials in food nanotechnology. *Journal of Food Science*, ۷۱(۹), R۱۰۷–R۱۱۶."



- [۸۹] "Duncan, T. V. (۲۰۱۱). Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: Barrier materials, antimicrobials and sensors. *Journal of Colloid and Interface Science*, ۳۶۳(۱), ۱-۲۴."
- [۹۰] "He, X., Hwang, H. M. (۲۰۱۶). Nanotechnology in food science: Functionality, applicability, and safety assessment. *Journal of Food and Drug Analysis*, ۲۴(۴), ۶۷۱-۶۸۱."
- [۹۱] "Shandilya, N., et al. (۲۰۲۲). Zinc oxide nanoparticles: Synthesis, characterization, and biomedical applications. *Frontiers in Nanotechnology*, ۴."
- [۹۲] "de Azeredo, H. M. C. (۲۰۱۳). Antimicrobial nanostructures in food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, ۳۰(۱), ۵۶-۶۹."
- [۹۳] "Tripathi, A & ,Jha, A. (۲۰۲۱). Nanotechnology for probiotics delivery: Recent trends and future perspectives. *Food Research International*, ۱۴۵, ۱۱۰۴۱۱."
- [۹۴] "Fadeel, B., et al. (۲۰۱۸). Safety assessment of nanomaterials: Implications for human health and the environment. *Nano Today*, ۲۲, ۴۴-۵۷."
- [۹۵] "Research Journal of Recent Sciences, Vol. ۴ (ISC-۲۰۱۴), ۹-۱۱ (۲۰۱۵)." (
- [۹۶] "> Soltani L, Mohammadi T. An overview of the applications of zinc oxide nanoparticles in the biological sciences. > *Journal of Cell and Tissue.* ۲۰۲۲;۱۳(۳):۲۱۵-۲۳۴".
- [۹۷] "<Soltani L, Mohammadi T. An overview of the applications of zinc oxide nanoparticles in the biological sciences* < Journal of Cell and Tissue.* ۲۰۲۲;۱۳(۳):۲۱۵-۲۳۴."
- [۹۸] "An overview of the applications of zinc oxide nanoparticles in the biological sciences."
- [۹۹] "An overview of the applications of zinc oxide nanoparticles in the biological sciences."
- [۱۰۰] "*Journal of Cell and Tissue."
- [۱۰۱] "Soltani L, Mohammadi T. An overview of the applications of zinc oxide nanoparticles in the biological sciences."
- [۱۰۲] "<An overview of the applications of zinc oxide nanoparticles in the biological sciences* < Journal of Cell and Tissue."*
- [۱۰۳] "Journal of Cell and Tissue.* ۲۰۲۲;۱۳(۳):۲۱۵-۲۳۴."



- [۱۰۴] <"Soltani L, Mohammadi T. An overview of the applications of zinc oxide nanoparticles in the biological sciences* < Journal of Cell and Tissue.* ۲۰۲۲."
- [۱۰۵] "Various figures and tables adapted and described from pages ۱۶-۲۵ of the original RSENS article."
- [۱۰۶] "Iler, R. K., Multilayers of colloidal particles. Jour-nal of Colloid and Interface Science ۱۹۶۶."
- [۱۰۷] "Yin, W.; Wang, Y.; Liu, L.; He, J., Biofilms: The Microbial "Protective Clothing" in Extreme Environ-ments. International journal of molecular sciences ۲۰۱۹.",
- [۱۰۸] "Ganji, Mahdiah, et al. "Gold nanoparticles conjugated L-lysine for improving cisplatin delivery to human breast cancer cells." Current Drug Delivery ۱۸.۶ (۲۰۲۱)." (
- [۱۰۹] "Chen, H., Weiss, J & ,Shahidi, F. (۲۰۰۶). Nanotechnology in nutraceuticals and functional foods. Food Technology."
- [۱۱۰] "Sozer, N & ,Kokini, J. L. (۲۰۰۹). The applications of nanotechnology in food industry. Trends in Biotechnology."
- [۱۱۱] <"Soltani L, Mohammadi T. An overview of the applications of zinc oxide nanoparticles in the biological sciences* < Journal of Cell and Tissue.* ۲۰۲۲;۱۳(۳):۲۱۵-۲۳۴."
- [۱۱۲] <"Soltani L, Mohammadi T. An overview of the applications of zinc oxide nanoparticles in the biological sciences* < Journal of Cell and Tissue.* ۲۰۲۲;۱۳(۳):۲۱۵-۲۳۴."