

ارزیابی کمی و کیفی نانوذرات در بسته‌بندی غذا با استفاده از روش‌های آنالیزی به منظور کاهش مخاطرات ناشی از مهاجرت

زهره هنرور^{۱*}، مهدی فرهودی^۲

تاریخ دریافت مقاله: تیرماه ۱۳۹۵

تاریخ پذیرش مقاله: دی ماه ۱۳۹۵

چکیده

طی سال‌های اخیر، با ظهور فناوری نانو و ورود آن به صنایع مختلف، به صورت چشمگیری پیشرفت‌های آن در ابعاد مختلف مشاهده می‌شود. صنعت بسته‌بندی غذایی نیز یکی از این صنایع است که به دنبال تأثیر مناسب بکارگیری فناوری نانو بر بهبود ویژگی‌های مختلف بسته‌بندی، با استقبال زیادی مواجه شده است. از طرفی نانوذرات به کار برده شده در بسته‌بندی، ممکن است همانند سایر اجزای آن به شبکه غذایی مهاجرت و مشکلاتی را برای ایمنی ماده غذایی ایجاد کند. نگرانی عمده‌ای که در به کارگیری فناوری نانو وجود دارد به اندازه کوچک نانوذرات مربوط می‌شود. اندازه کوچک خیلی از نانو مواد، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوتی نسبت به ترکیبات شیمیایی مشابه با ابعاد میکرومتری ایجاد می‌کند. امروزه دستیابی به پاسخ این سؤال که چطور فرآیندهایی بر پایه نانومواد ممکن است بر سلامت انسان اثر بگذارند، دانش و مطالعه بیشتری را می‌طلبد. در این مقاله، ضمن بیان مختصر اهمیت و کاربردهای فناوری نانو در بسته‌بندی غذا، روش‌هایی که به منظور تعیین ویژگی‌های کمی و کیفی نانوذرات در جهت ارزیابی‌های مربوط به مهاجرت و ایمنی آن‌ها وجود دارد، بررسی می‌شود. همچنین، به جنبه‌های کلی مهاجرت نانو ذرات، روش‌های اندازه‌گیری مهاجرت و برخی قوانین مربوط به استفاده از فناوری نانو در حوزه بسته‌بندی بررسی می‌شوند.

۱- مقدمه

هدف از بسته‌بندی مواد غذایی، جلوگیری از فساد ماده غذایی، هدررفت مواد مغذی و به طور کلی افزایش مدت زمان ماندگاری آن‌ها است. عمده‌ترین کاربرد فناوری نانو در صنعت غذا، برای بسته‌بندی مواد غذایی است. فناوری نانو، امیدهای بسیاری برای دستیابی به بسته‌بندی مواد غذایی با قابلیت‌های ایمنی و نگهداری بیشتر و در نهایت غذای سالم‌تر، ایجاد می‌کند. نانوذرات در نانوکامپوزیت‌های پلیمری سطح ویژه بالایی نسبت به ذرات در اندازه میکرومتری دارند. همین سطح ویژه بالا موجب بهبود برهمکنش بین پلیمر و نانوذرات می‌شود و دستیابی به ویژگی‌های مناسب را ممکن می‌سازد [۱]. از جمله نانوذرات مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی

واژه‌های کلیدی

نانوکامپوزیت^۳، نانوذرات، مهاجرت^۴، قوانین، بسته‌بندی غذا، روش‌های ارزیابی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، کمیته پژوهشی دانشجویان، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

(* نویسنده مسئول: z.honarvar@yahoo.com)

۲- استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، انستیتو تحقیقات تغذیه و صنایع غذایی کشور، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران (Farhoodi@sbm.ac.ir)

3- Nanocomposite

4- Migration

فصلنامه علمی-ترویجی علوم و فنون
بسته‌بندی

ترتیب از نظر اقتصادی و هم از نظر زیست-محیطی ارزشمند است [۳].

با توجه به اهمیت نانوکامپوزیت‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی و افزایش کاربرد آن‌ها در این صنعت طی سال‌های اخیر، لازم است روش‌های کمی و کیفی ارزیابی این ترکیبات شناخته شود تا مخاطرات ناشی از مهاجرت آن‌ها به حداقل رسانده شود.

۲- تعریف

کامپوزیت‌ها به طور متداول شامل یک شبکه پلیمری (یا فاز پیوسته) و پرکننده (یا فاز غیرپیوسته) هستند. فیبرها، صفحه‌های کوچک و ذرات برای تشکیل کامپوزیت‌های پلیمری با افزایش خواص بازدارندگی و حرارتی دهه هاست که استفاده می‌شوند. نانوکامپوزیت‌ها، موادی هستند که پرکننده‌های آن‌ها حداقل در یکی از ابعاد کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر باشند. خواص مکانیکی و حرارتی نانوکامپوزیت‌ها با مواد سازنده آن‌ها به طور محسوسی متفاوت هستند. پلیمرهای نانوکامپوزیتی گروه جدیدی از مواد محکم‌تر، مقاوم‌تر نسبت به حرارت و با خواص بازدارندگی بالا می‌باشند. انواع نانوکامپوزیت را می‌توان بر اساس ماده پایه آن‌ها به نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری، سرامیکی و فلزی طبقه‌بندی نمود. کاربرد نانوکامپوزیت‌های بر پایه پلیمر در بسته‌بندی مواد غذایی بیشتر شایع است [۴].

۳- روش‌هایی برای ارزیابی نانو مواد

تشخیص، تعیین ویژگی و کمی‌سازی نانو مواد در ماتریس^۱ غذا به منظور تحقیق در زمینه مخاطرات نانوذرات برای مصرف‌کنندگان بسیار مهم است. این مخاطرات بدون اینکه توصیف صحیحی از آن‌ها داشته باشیم نمی‌توانند کمی‌سازی شوند. عملکرد نانومواد می‌تواند در ماتریس‌های غذایی متفاوت بسته به نوع ترکیبات و شرایط ترمودینامیکی^۲ تغییر کند. معمولاً این موضوع برای نانو ذرات فلزی صحت دارد زیرا این مواد

می‌توان به نانورس و نانوقره اشاره کرد. کاربردهای مختلفی از فناوری نانو در بسته‌بندی مواد غذایی وجود دارد، که عبارتند از: کاربرد نانوکامپوزیت‌های پلیمر/رس به عنوان مواد غیرقابل نفوذ، نانو ذرات نقره و مس به عنوان عوامل ضد میکروبی قوی و نیز روش‌های مبتنی بر نانو سنسورها برای تشخیص کیفیت و شناسایی مواردی مانند گازها و عوامل بیماری‌زا در مواد غذایی بسته‌بندی شده. مرور تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که فناوری نانو یک ابزار مؤثر و کارآمد در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی است و می‌تواند نقش بزرگی در حفظ کیفیت مواد غذایی داشته باشد.

پلیمرهای مصنوعی رایج‌ترین مواد مورد استفاده در بسته‌بندی‌های غذایی می‌باشند؛ اما زیست تخریب‌پذیری مواد پلاستیکی سنتزی حاصل از مشتقات نفتی، فرآیندی بسیار کند است و این امر باعث افزایش آلودگی‌های محیط زیست می‌گردد. بیوپلیمرهای خوراکی با زیست تخریب‌پذیری بالا که از منابع قابل تجدیدپذیر کشاورزی حاصل می‌شوند، جایگزین مناسبی برای مواد پلاستیکی هستند؛ اما همه بیوپلیمرها یک مشکل مشترک دارند و آن بازدارندگی نسبتاً ضعیف آن‌ها در برابر بخار آب است و همین امر کاربرد آن‌ها را در بسته‌بندی محدود می‌کند. به همین دلیل تمایل در زمینه توسعه فناوری‌هایی به منظور افزایش خواص بازدارندگی آن‌ها افزایش پیدا کرده است. همچنین بیوپلیمرها خواص مکانیکی و حرارتی ضعیفی از خود نشان می‌دهند که برای کاربردهای بسته‌بندی نقص بزرگی محسوب می‌شود [۲].

متداول‌ترین راه‌حل برای افزایش ویژگی بازدارندگی بسته‌بندی، استفاده از ترکیب پلیمرها، مواد پوشش‌دهنده با خواص بازدارندگی بالا، استفاده از فیلم‌های چندلایه (که حاوی یک فیلم با خواص بازدارندگی بالا می‌باشند) و ... هستند. در این بین یکی از مؤثرترین روش‌های پرکردن پلیمرها با استفاده از پرکننده‌هایی است که کامپوزیت‌ها را تولید می‌کنند و منجر به افزایش خواص بازدارندگی پلیمرها و بیوپلیمرها می‌گردند. همچنین استفاده از نانوکامپوزیت‌ها باعث می‌گردد که مواد اولیه کمتری مصرف گردد به این

1- Matrix

2- Thermodynamic

برای رسیدن به فعالیت به یک سطح واکنشگر نیاز دارند و بنابراین به شدت با اجزای غذا واکنش می‌دهند. روش‌های آنالیزی جزئی‌تری برای شناسایی مهاجرت اجزای مواد بسته‌بندی به ماده غذایی نیاز است که این به دلیل پیچیدگی نانومواد می‌باشد [۵].

برای اندازه‌گیری نانومواد در ماتریس‌های مختلف، روش‌های ارزیابی باید به اندازه کافی برای شناسایی غلظت‌های کم حساس باشند. زیرا ذرات کوچک، بخش کوچکی از یک توده کلی را تشکیل می‌دهند. این روش‌ها نه تنها باید اطلاعاتی درباره غلظت و ترکیب نانومواد بدهند بلکه خواص فیزیکی و شیمیایی نانومواد مهندسی شده در نمونه‌ها را نیز مشخص نمایند. با این وجود، تعیین مقدار حقیقی نانو مواد موجود در غذا همیشه امکان‌پذیر نیست. در چنین ماتریس‌های پیچیده‌ای، هیچ روش منفردی نمی‌تواند همه اطلاعات را فراهم نماید و روش‌های ترکیبی برای شناسایی آن‌ها نیاز است. به عنوان مثال، آزمون مهاجرت نانوذرات به غذاهای چرب بسیار طولانی و خسته‌کننده است. زیرا جداسازی و شناسایی اجزای چربی دوست موجود در غلظت‌های کم، در ماتریس‌های چربی دشوار است. بنابراین روش‌هایی باید پایه‌گذاری و استانداردسازی شود که حضور نانو مواد را در غذا یا شبیه‌سازهای غذایی شناسایی نمایند [۶]. در این قسمت، ترکیبی از روش‌های متفاوتی که برای آنالیز نانومواد کاربرد دارند، مورد بحث قرار می‌گیرند. همچنین (جدول ۱)، قسمتی از کاربردهای این روش‌ها در محیط‌های گوناگون را به علاوه مطالعاتی که درباره مهاجرت صورت گرفته است خلاصه می‌کند [۵].

الف- روش‌های میکروسکوپی: روش ایده‌آل برای شناسایی و تصویر کردن نانو مواد از نظر خواص گوناگون آن‌ها نظیر اندازه، شکل، ساختار، نحوه توزیع و تجمع آن‌ها به صورت اصلی روش‌های میکروسکوپی الکترونی (EM) و تجهیزات مربوط به آن‌ها هستند. روش‌های میکروسکوپی الکترونی (EM) بر پایه استفاده از الکترون‌های شتاب یافته به

عنوان منبع روشنایی، تفکیک پذیری بسیار بیشتری دارند. در این بین، روش‌های معروف‌تر، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)^۲، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)^۳ و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)^۴ می‌باشند. بسته به نوع روش، قدرت تفکیک‌پذیری ۱-۰/۱ نانومتر می‌تواند باشد. با این وجود، به دلیل اینکه سهم خیلی کوچکی از نمونه ارزیابی می‌شود، برای به دست آوردن اطلاعات قابل ارائه، باید صدها و هزاران ذره شمرده شوند که کاری سخت، خسته‌کننده و ناکارآمد است. علاوه بر آن، روش‌های میکروسکوپی الکترونی (EM) معمولاً مخرب هستند؛ به این معنی که یک نمونه نمی‌تواند به وسیله روش دیگری برای تأیید مجدداً ارزیابی شود.

در روش میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، الکترون‌ها از میان نمونه عبور داده می‌شوند تا تصویری که اطلاعاتی دو بعدی درباره نانوذرات فراهم می‌کند به دست آید؛ نظیر شکل، ریزساختار^۵، توزیع اندازه، یکنواختی و درجه تجمع با قدرت تفکیک‌پذیری حدود ۰/۱ نانومتر. TEM‌هایی با قدرت تفکیک بالا حتی می‌توانند به وضوح لایه‌های اتمی نمونه‌های (بلورین) را نشان دهند. با این وجود هیچ نمونه مایعی نمی‌تواند در محفظه میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) قرار بگیرد و پیش تیمارهای صحیح روی نمونه ضروری می‌باشند. روش آبگیری^۶ نیز می‌تواند منجر به تجمع ناخواسته ذرات و تغییراتی در خواص سطحی آن‌ها شود. روش‌های تثبیت شیمیایی معمولاً برای بافت‌های بیولوژیکی^۷ و دیگر ماتریس‌های پیچیده برای حفظ حالت اصلی آن‌ها مورد نیاز هستند [۷]. در روش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، یک باریکه الکترونی متمرکز به سطح نمونه برخورد می‌کند و تصویری از شکل ظاهری سطح نمونه فراهم می‌کند مانند

2- Transmission Electron Microscopy

3- Scanning Electron Microscopy

4- Atomic Force Microscopy

5- Morphology

6- Dehydration

7- Biological

1- Electronic Microscope

جدول ۱- خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده درباره مهاجرت از بسته‌بندی‌های نانوکامپوزیتی غذا [۵]

| منبع | نانوذره مهاجرت کننده | مهم‌ترین جزء بسته‌بندی | غذا/شبهه‌ساز | دما/نگهداری | زمان نگهداری | روش ارزیابی مهاجرت | مشاهده کلیدی |
|--|----------------------|------------------------|------------------|-------------|------------------|--------------------------------|--|
| Avella et al. 2005 | رس | نشاسته | کاهو، اسفناج/ آب | ۴۰°C | ۱۰ روز | GFAAS ¹ | تماس فیلم با سبزیجات باعث افزایش چشمگیری در آهن و منیزیم نشد در حالیکه افزایش محتوی سیلیسیم مشاهده شد. |
| Bott et al. 2014 | کربن سیاه | LDPE, PS | 3% HAC, 95% EtOH | ۴۰.۶°C | ۱-۱۰ روز | FFF-ICP-MS, MALLS ² | کربن سیاه از مواد بسته‌بندی به شبهه ساز غذایی مهاجرت نکرد. |
| Busolo & Lagaron. 2012 | آهن، رس | HDPE, LLDPE | آب، ایزواکتان | ۲۰، ۴۰°C | ۲-۱۰ روز | ICP-MS | مهاجرت آهن و آلومینیوم از اجزای فعال در تماس مستقیم با شبهه ساز غذا، بسیار کم و ناچیز بود. |
| Busolo, Fernandez, Ocio, & Lagaron. 2010 | نقره | PLA | 3% HAC | دما اتاق | ۱-۸ روز | ASV ³ | هیدرولیز جزئی PLA از سطح تماس، پتانسیل تسهیل فرآیند مهاجرت را دارد. |
| Conte et al. 2013 | مس | PLA | محلول نمکی | - | ۴-۲۴ ساعت | AAS ⁴ | فرآیند رهایش یون در طول ساعات اولیه با معادله درجه اول قابل توصیف بود |
| Cushen et al. 2013 | نقره | PVC | گوشت مرغ | ۲۰، ۵°C | ۱-۴ روز | ICP-MS | دما و زمان بر میزان مهاجرت نقره از نانوکامپوزیت تأثیر گذاشت اما اندازه نانوذره مؤثر نبود. |
| Echegoyen & Nerin. 2013 | نقره | ظروف پلاستیکی | 3% HAC, 50% EtOH | ۷۰، ۴۰°C | ۲ ساعت تا ۱۰ روز | SEM-EDX ICP-MS ⁵ | میزان مهاجرت هنگام حرارت‌دهی در مایکروویو بیشتر از روش‌های مرسوم حرارت‌دهی بود. |
| Emamifar et al. 2010 | نقره و اکسید روی | LDPE | آب پرتقال | ۴°C | ۲۸ روز | GFAAS | مهاجرت روی سرعت بیشتری نسبت به نقره داشت. |
| Farhoodi et al. 2014 | رس | PET | 3% HAC | ۲۵، ۴۵°C | ۷-۹۰ روز | ICP-OES ⁶ | غلظت حل شده بیشتر از آلومینیوم حل شده بود. |

- 1- Graphite Furnace atomic Absorption Spectroscopy
- 2- Flow field Fractionation, Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, Multi-Angle Laser Light-Scattering Spectrometry
- 3- Anodic Stripping Voltammetry
- 4- Atomic Absorption Spectrometry
- 5- Scanning Electron Microscopy, Energy Dispersive X-ray, Inductively Coupled Plasma Mass
- 6- Inductively Coupled Plasma, Optical Emission Spectrometry

گردد. تصویربرداری از نانو مواد در حالت طبیعی آن‌ها در زمینه پژوهش نانو مواد بسیار بحرانی است؛ هرچند هیچ یک از این پیش تیمارها نمی‌توانند کاملاً از مواردی که در نتیجه خشک کردن نمونه یا آماده‌سازی پیش می‌آید، جلوگیری کنند. این موارد با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و محیطی^۲ (ESEM) که اجازه تصویربرداری از نمونه را در حالت اصلی بدون هیچ اصلاح یا پیش تیماری، تحت رطوبت متغیر تا ۷۵ درصد فراهم می‌کند، قابل اجتناب است [۷].

تصویری که با چشم مشاهده می‌شود. SEM قدرت تفکیک‌پذیری کمتری نسبت به میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) دارد ولی قابلیت نقشه‌برداری (توپوگرافی^۱) سطح نمونه و ترکیب آن را دارد. ابزار میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با آشکارگرهایی که می‌توانند در خلأ زیاد یا خلأ کم عمل کنند، برای آنالیز نمونه‌های زیستی کاربردی هستند. سطح نمونه باید قابلیت هدایت جریان را داشته باشد. بنابراین نمونه باید با لایه‌ای از مواد رسانا پوشش داده شود؛ اما این کار می‌تواند باعث از دست رفتن اطلاعات

2- Environmental SEM

فصلنامه علمی-ترویجی علوم و فنون
بسته‌بندی

1- Topography

میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، اطلاعات سه بعدی از سطح نمونه‌های جامد یا مایع را فراهم می‌نماید. یک پایه نوسانگر سطح نمونه را اسکن می‌کند و نیروهای الکتروستاتیکی^۱ بین سطح و گوشه‌ها اندازه‌گیری می‌شوند. بنابراین میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) قابلیت آشکارسازی شکل نانوذرات و نمایه زبری^۲ آن‌ها را با قدرت تفکیک‌پذیری بالا، در حدود ۰/۵ نانومتر دارد. قدرت اصلی میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) این است که از ساختارهایی با اندازه ۰/۱-۱ نانومتر تحت شرایط مرطوب یا خیس می‌تواند تصویربرداری کند. هرچند میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) برای نمونه‌های مربوط به غذا در به دست آوردن اطلاعات کمی و کیفی ترکیب نمونه‌ها محدودیت دارد [۸].

ب- روش‌های اسپکتروسکوپی (طیف‌سنجی):
روش‌های طیف‌سنجی برای توصیف و آنالیز نانومواد مثل تعیین اندازه و انباشتگی در پراکنش‌ها^۳ یا محلول‌هایی با اندازه ۱ نانومتر تا ۱۰ میکرومتر استفاده می‌شود.
در روش پراش پرتو ایکس^۴ (XRD) تعیین کیفی نانومواد کریستالی قابل درک است. این روش برای آشکار کردن اطلاعاتی درباره ترکیب عنصری یا ساختار بلورشناسی نانومواد طبیعی یا مهندسی شده بر پایه قدرت باریکه پرتوی ایکس متفرق شده روی نمونه استفاده می‌شود. با تداخل سازنده دو دسته پرتو یکی از سطح و یکی از داخل نمونه، الگوهای پراش پرتو ایکس ظاهر می‌شوند. این روش غیرمخرب است و پیش تیمارهای پیچیده برای نمونه نیاز نیست که منجر به کاربردهای وسیع آن در توصیف مواد می‌گردد. معمولاً از روش پراش پرتو ایکس (XRD) برای توصیف پراکندگی مونت موریلونیت^۵ در مواد پلیمری با کاربردهای بسته‌بندی استفاده می‌شود. پراش پرتوی ایکس

زاویه کوچک^۶ (SAXS) روش آنالیزی مشتق شده از روش پراش پرتو ایکس (XRD) است. از این روش برای آنالیز ساختارهای خودآرایش یافته نانوذرات نظیر نانولوله‌ها استفاده می‌شود و برای مواد جامد و مایع کاربرد دارد [۹].
از آنجایی که خواص نوری نانو مواد از مواد مشابه با اندازه میکرومتری متفاوت است؛ طیف‌بینی^۷ (UV-VIS) برای توصیف نانوذرات قابل استفاده است. به دلیل هزینه کم و عملکرد آسان، طیف‌بینی (UV-VIS) به عنوان روشی پشتیبان برای شناسایی حضور نانوذرات و توصیف کیفیت آن‌ها به کار می‌رود. معمولاً افزایش غلظت نانوذرات منجر به کاهش عبور (UV-VIS) می‌شود، زیرا ناحیه سطحی بزرگ‌تر نانوذرات منجر به افزایش کارایی جذب آن می‌گردد. طول موج‌های طیف جذبی (UV-VIS) تابعی از اندازه متوسط ذرات و اطلاعاتی درباره توزیع ذرات می‌باشد [۱۰].

ج- روش‌های آنالیزی کمی: آنالیزهای کمی و عنصری نانومواد مهاجرت‌کننده عمدتاً با پلاسمای القایی جرم^۸ (ICP-MS)، نشر اتمی^۹ (ICP-AES) و طیف‌بینی نشر نوری^{۱۰} (ICP-OES) صورت می‌گیرد. انتخاب‌پذیری، حساسیت و صحت این روش‌ها آن‌ها را به کارآمدترین روش‌های تعیین یون‌های فلزی ناچیز تبدیل کرده است. در این روش‌ها، غلظت نمونه معمولاً به عنوان یک عامل محدودکننده محسوب نمی‌شود و حد شناسایی آن‌ها به صورت معمول بین ۰/۱ تا ۱۰ ppm است. نتایج به شدت به پیچیدگی نمونه وابسته است. معمولاً ICP-MS به دلیل انتخاب‌پذیری و حساسیت بالا نسبت به ICP-OES و ICP-AES بیشتر مورد توجه است. زمانی که نانومواد وارد ICP می‌شوند، اتم‌های نمونه تولید جریانی از یون‌های

6- Small Angle X-Ray Scattering

7- Ultraviolet-Visible Spectroscopy

8- Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

9- Inductively Coupled Plasma, Atomic Emission Spectrometry

10- Inductively Coupled Plasma, Optical Emission Spectrometry

1- Electrostatic Forces

2- Roughness Profile

3- Dispersion

4- X-Ray Diffraction

5- Montmorillonite

اتمی^۷ (AAS) نوعی روش مؤثر و جایگزین ICP می‌باشد که به علت سرعت بالا، صحت، حساسیت و همچنین ارزیابی نسبی برای شناسایی نانومواد به کار می‌رود. این روش بیشتر برای تعیین کمی غلظت عناصر فلزی خاص در نمونه‌هایی مثل غذا و یا بیومواد استفاده می‌شود و از طریق اندازه‌گیری انرژی که به شکل فوتون‌های^۸ نوری، جذب عناصر شیمیایی مد نظر می‌شوند عمل می‌کند؛ این کار از طریق خواندن طیف زمانی که نمونه به وسیله پرتودهی تهییج می‌شود صورت می‌گیرد. با این وجود طیف‌بینی جذب اتمی (AAS) دامنه خطی محدودی دارد و برای آنالیزهای چند عنصری موفقیت‌آمیز نیست. یک چالش ویژه دیگر آن، تشخیص صحیح نانوذرات نسبتاً کوچک از سیگنال یون‌های حل شده است [۱۳].

۴- ارزیابی مهاجرت در بستهبندی‌های نانوکامپوزیتی

مهاجرت، فرآیند انتقال جرم است که طی آن جرم‌های مولکولی کوچک موجود در بستهبندی به محصول بستهبندی شده انتقال می‌یابند؛ چرا که مواد بستهبندی به لحاظ شیمیایی بی‌اثر نیستند و تماس مستقیم بستهبندی و محصول می‌تواند منجر به مهاجرت مواد به محصول گردد. در بستهبندی غذایی، این مسئله بحرانی است؛ زیرا انتقال ناخواسته اجزای بستهبندی به غذا ممکن است بر ایمنی غذا برای مصرف‌کننده اثر بگذارد. همچنین مهاجرت نانومواد ممکن است در نهایت باعث تغییرات حسی^۹ غذاها شود. برای مثال TiO_2 می‌تواند منجر به ترش‌شدگی ناشی از اکسیداسیون^{۱۰} لیپیدها در غذاهای چرب گردد. برای بررسی امکان کاربرد نانومواد در بستهبندی غذا و ارزیابی ایمنی بستهبندی در تماس با غذا، ضروری است که آنالیزهای مهاجرت را تحت شرایط کنترل‌شده‌ای که مستقیماً به نوع غذا یا شبیه‌ساز غذایی بستگی دارد، مورد

گازی در پلاسما می‌نمایند که به عنوان یک پالس منفرد به وسیله آشکارساز اندازه‌گیری شده و به شکل یک پیک در منحنی ظاهر می‌شوند. حضور نانومواد می‌تواند باعث تداخل در نمونه و محافظه اسپری شود و همچنین حضور اجزای غذا ممکن است مانع از اتمی شدن کامل نمونه شود. در نتیجه یک مرحله هضم نمونه قبل از آنالیز آن لازم است [۱۱]. در مورد ICP-MS، نمونه نمی‌تواند مستقیماً به محافظه یون تزریق شود بلکه این کار باید از طریق روش‌های ترکیبی مثل کروماتوگرافی هیدرودینامیک^۱ (HDC-ICP-MS) و مشتق‌سازی میدان جریان^۲ (FFF-ICP-MS) صورت گیرد. HDC ذرات را بر اساس ضریب انتشار که رابطه معکوس با قطر دینامیکی آن‌ها دارد، جدا می‌کند. حداقل آماده‌سازی نمونه مورد نیاز است و حداقل تداخل نمونه طی عبور نمونه از ستون (HDC) رخ می‌دهد. در (FFF) یک نیروی میدان خارجی، منجر به بازداري افتراقی نانوذرات طبق شعاع هیدرودینامیکی^۳ آن‌ها می‌گردد. بنا بر نوعی استخراج^۴ وابسته به اندازه یا زمان، ذرات نمونه به سمت یک یا چند آشکارساز هدایت می‌شوند. روش (FFF) برای تعیین توزیع اندازه ذرات معلّق در شبیه‌سازهای غذا در مطالعات مربوط به مهاجرت بسیار مناسب است. هر چند هر دو روش HDC و FFF برای تعیین غلظت‌های خیلی کم نانومواد در سطوح ng/L ناتوان هستند. ICP-MS ذره منفرد^۵ (SP-ICP-MS) نوعی روش آنالیزی جدید است که از طریق معرفی مجرای نانومواد بر پایه فلز به سمت ICP-MS عمل می‌کند و سپس منحنی‌های^۶ مربوط به زمان را برای هر ذره طی زمان اقامت آن ثبت می‌کند. از شدت و تعداد منحنی‌ها می‌توان اطلاعاتی درباره اندازه و غلظت ذره‌ها به دست آورد. SP-ICP-MS می‌تواند اندازه‌های ذره‌های ۱۰ نانومتری و کمتر را با حدود تشخیص غلظت‌های خیلی کم اندازه‌گیری کند (به طور نرمال سطوح ۱ در تریلیون) [۱۲]. طیف‌بینی جذب

1- Hydrodynamic Chromatography ICP-MS

2- Flow Field Fractionation ICP-MS

3- Hydrodynamic

4- Elution

5- Single Particle ICP-MS

6- Peak

7- Atomic Absorption Spectrometry

8- Photons

9- Organoleptic Changes

10- Lipid Oxidation

بررسی قرار دهیم [۱۱]. در (جدول ۱) خلاصه‌ای از مطالعات مربوط به مهاجرت برای بسته‌بندی‌های دارای نانو مواد نشان داده شده است.

۵- جنبه‌های کلی و عمومی مهاجرت نانو مواد

فرآیند مهاجرت شامل دو مرحله است. مرحله اول مهاجرت به علت آن دسته از نانو موادی است که در لایه سطحی ریزپوشانی^۱ شده‌اند. رهائش بعدی نانو مواد از قسمت داخلی نمونه به درون حفره‌ها و دیگر فواصل بین مولکول‌های پلیمر صورت می‌گیرد که بستگی به خواص پلیمر نظیر: دانسیته^۲، بلورینگی آن و درجه اتصالات و پیوندها دارد. در بعضی موارد، نانو موادی که به خوبی درون فیلم ریزپوشانی شده‌اند، لازم است که اکسید شده و به بیرون مهاجرت نمایند [۱۴].

اینکه مهاجرت نانو مواد به غذا با چه سرعت و به چه میزانی رخ می‌دهد، بستگی به خواص فیزیکی و شیمیایی غذا و پلیمر دارد. عوامل متعددی چون غلظت اولیه، اندازه ذرات، وزن مولکولی، حلالیت و ضریب انتشار ماده خاصی درون پلیمر، همچنین میزان pH، دما، ساختار پلیمر و ویسکوزیته^۳، تنش‌های مکانیکی، زمان تماس، ساختار غذا و عوامل کنترل‌کننده اصلی در مهاجرت دخالت دارند. حلالیت نانو مواد فلزی در محلول‌های آبی با افزایش دما و کاهش pH افزایش می‌یابد که باعث افزایش مهاجرت فلز در سامانه می‌شود. مهاجرت نانو مواد با سرعت زیاد می‌تواند به افزایش ضریب انتشار نسبت داده شود که در ماتریس‌های پلیمری با وزن مولکولی کمتر و بنابراین حجم آزاد بیشتر، قابل انتظار است. سرعت مهاجرت در سامانه با کاهش اندازه نانوذرات و ویسکوزیته دینامیک پلیمر، افزایش می‌یابد. اگر خود غذا تمایل زیادی به پلیمر داشته باشد، ممکن است توسط بسته‌بندی جذب شده و باعث تورم یا نرم شدن ماتریس پلیمری شود در نتیجه فضاها بزرگ‌تر شده و سرعت مهاجرت افزودنی نیز بیشتر می‌شود. به عنوان مثال اجزای

غذا به‌ویژه چربی که به درون پلاستیک‌هایی مثل پلی اتیلن یا پلی پروپیلن مهاجرت می‌کنند، به طور قابل توجهی باعث افزایش تحرک اجزای پلاستیک شده و بنابراین میزان مهاجرت را به غذای بسته‌بندی شده افزایش می‌دهد. افزودنی‌های شیمیایی آلی نظیر نرم‌کننده‌ها، پایدارکننده‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها و ... در پلاستیک نیز ممکن است به غذا مهاجرت نمایند که این باعث کاهش حلالیت نانو مواد در ماتریس غذا و ممانعت‌های بعدی نسبت به مهاجرت آن‌ها به ماده غذایی می‌شود. علاوه بر آن، مهاجرت نانو مواد به روش‌های نگهداری یا استریل کردن غذا نیز حساس است. به عنوان مثال حرارت‌دهی با مایکروویو سرعت مهاجرت یون نقره را افزایش می‌دهد که این به دلیل تغییرات ساختاری در پلاستیک است زمانی که پلاستیک در معرض مایکروویو قرار می‌گیرد، اتفاق می‌افتد. بعضی نانو مواد ناحیه سطحی زیاد و شیمی سطحی فعالی دارند که ممکن است منجر به واکنش‌های شیمیایی شود. بنابراین استفاده از نانو مواد ممکن است تشکیل محصولات ناخواسته و واکنش‌ها طی ساخت مواد بسته‌بندی را افزایش دهد و یا سرعت مهاجرت مواد غیر نانومتری را کم کرده یا آن را تشدید نماید. به طور مثال افزودن نانو ذرات رس^۴ به فیلم پلی‌آمید^۵ (PA) باعث کاهش سرعت مهاجرت تریکلوسان^۶ می‌شود. این مسئله نه تنها به مسیر پر پیچ و خم ایجاد شده به وسیله نانوذرات، بلکه به پدیده چسبندگی نسبت داده می‌شود [۱۰ و ۱۵].

۶- روش‌های آزمون مهاجرت

آزمون‌های مهاجرت جنبه مهم ارزیابی ایمنی هستند. ماده بسته‌بندی چه دارای نانو مواد و چه بدون آن‌ها در معرض آزمون‌های مهاجرت پایه‌گذاری شده به وسیله قوانین اروپا در مورد پلاستیک‌های در تماس با مواد غذایی قرار می‌گیرد. هرچند بهترین روش برای انجام آزمون مهاجرت، استفاده از ماتریس حقیقی غذاست؛ اما به

4- Clay Nanoparticles

5- Polyamide

6- Triclosan

1- Encapsulation

2- Density

3- Viscosity

اتفاق می‌افتد. آزمون یک‌طرفه^۶ واقع‌گرایانه‌ترین روش برای مواد بسته‌بندی است که تنها یک طرف آن‌ها در تماس با غذا قرار می‌گیرد و مخصوصاً برای ساختارهای چندلایه‌ای نامتقارن توصیه می‌شود. در پایان آزمون از یک روش ارزیابی صحیح (در قسمت قبل توضیح داده شد) برای اندازه‌گیری مقدار ماده مورد نظر در غذا یا شبیه‌ساز غذایی استفاده می‌شود و سطح مهاجرت با این روش تخمین زده می‌شود. هرچند از آنجایی که هیچ روش آنالیز استاندارد برای تعیین ویژگی و مقدار نانوذرات در شبیه‌سازهای غذایی یا ماتریس‌های پیچیده‌تر وجود ندارد، استفاده از گروهی از روش‌های آنالیزی کمی مثل ICP با غلظت جرمی در سطوح کمتر از ng/L بهترین روش است [۱۱ و ۱۲].

همچنین از آنجایی که مهاجرت اختصاصی، تنها یک ماده مهاجرت‌کننده را بررسی می‌کند؛ میانکنش‌های کلی بین بسته‌بندی و غذا بهتر است از طریق مهاجرت کل اندازه‌گیری شود که مقدار کل ترکیبات مهاجرت‌کننده در غذا را که مستقل از ترکیب ماده مهاجرت‌کننده است، اندازه می‌گیرد.

۷- توسعه قوانینی برای بسته‌بندی‌های نانو کامپوزیتی

از آنجایی که فناوری نانو قابلیت خود را در کاربردهای مختلف در جهان واقعی نشان داده است، محصولاتی در بازار طی سال‌های اخیر ظهور پیدا کرده‌اند. اطلاعات حاکی از آن است که بازار تجاری نانو مواد شامل بیش از هزار محصول شناسایی شده تا سال ۲۰۱۱ است. مطالعه‌ای درباره ظهور فناوری نانو منتشر شده است که نشان می‌دهد بیشتر در مورد مواد در تماس با غذا به منظور بسته‌بندی، نگهداری یا پخت به کار می‌رود. علی‌رغم قابلیت اقتصادی و اجتماعی باورنکردنی فناوری نانو، بازار جهانی با موانع متعددی در زمینه قانون‌گذاری این محصولات مواجه است [۱۶]. در این بخش، قوانین

دلیل آنکه بیشتر ماتریس‌های غذایی ترکیبات پیچیده‌ای دارند، اندازه‌گیری مستقیم مهاجرت در غذا به لحاظ آنالیزی فرآیندی سخت، خسته‌کننده و زمان‌بر است. روش معتبر برای ارزیابی فرآیند انتقال جرم، ارزیابی مهاجرت کلی و اختصاصی ماده هدف با استفاده از شبیه‌سازهای غذایی طبق مشخصات هر مورد است. شبیه‌سازهای غذایی سامانه‌های مدلی انتخاب شده‌ای هستند که میانکنشی^۱ مشابه میانکنش‌های غذا تولید می‌نمایند که دلالت بر این دارد که میزان و سرعت فرآیند انتقال جرم باید مشابه باشد. معمولاً آب به عنوان شبیه‌ساز غذایی برای رنج (دامنه) گسترده‌ای از محصولات غذایی نظیر: نان، سبزی، میوه‌های تازه، گوشت و ماهی به کار می‌رود. استفاده از محلول‌های کمی اسیدی شده آب (حاوی ۳ درصد استیک اسید) برای مواد غذایی اسیدی آبی نظیر: کولا و نوشیدنی‌های کربناته که pH کمتر از ۴/۶ دارند، به عنوان شبیه‌ساز به کار می‌رود. غذاها و نوشیدنی‌های الکلی می‌توانند با محلول ۱۰ درصد اتانول^۲ یا قدرت الکلی بیشتر در صورتی که غلظت آن‌ها از ۱۰ درصد بیشتر باشد، شبیه‌سازی شوند. در مورد مواد حساس به آبی که برای بسته‌بندی مواد غذایی خشک شده استفاده می‌شوند (مثل کاغذ، مقوا یا بیوپلاستیک‌ها^۳) آزمون‌های جایگزین شامل استفاده از بعضی شبیه‌سازهای جامد مثل اکسید پلی‌فنیل^۴ اصلاح شده و ژل‌های بر پایه پلی‌ساکارید می‌باشند [۱۱]. میزان^۵ استخراج‌پذیری یک جزء به بسته‌بندی می‌تواند از طریق تماس آن با غذا یا شبیه‌سازهای غذایی در زمان و دمای مشخصی اندازه‌گیری شود که این شرایط طبق مصرف مورد نظر برای آن ماده غذایی در نظر گرفته می‌شود. آزمون‌های تماس، با روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد. روش غوطه‌وری راحت‌ترین راه برای آزمایش مهاجرت است. سطح داخلی و خارجی مواد در تماس با شبیه‌ساز غذایی قرار می‌گیرد و مهاجرت از هر دو طرف

- 1- Interaction
- 2- Etanol
- 3- Bioplastic
- 4- Tenax
- 5- Extractability

6- Single-Side

موجود برای ارزیابی ایمنی فناوری نانو به خصوص در زمینه مواد در تماس با غذا پرداخته می‌شود.

۸- جنبه‌های قانونی آمریکا و اروپا درباره استفاده از فناوری نانو در غذا

در بیشتر کاربردهای فناوری نانو در غذا، باید فرآیندهایی به منظور کسب مجوز قبل از تأیید مصرف سپری شوند. نگرانی عمده‌ای که در فناوری نانو وجود دارد به اندازه کوچک مواد برمی‌گردد. اندازه کوچک خیلی از نانو مواد باعث می‌شود که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوتی را نسبت به متناظرهای شیمیایی با اندازه میکرو خود نشان دهند که دلالت بر این دارد که مطالعات سم‌شناسی که به صورت مرسوم برای ذرات بزرگ انجام می‌شود نمی‌تواند به راحتی برای تعیین نمایه سمیت ذرات کوچک تعمیم داده شوند. این یک مشکل ویژه است چرا که تصمیم درباره^۱ GRAS بودن یک ماده در غیاب ارزیابی‌های ایمنی نانوذرات صورت می‌گیرد [۱۷]. یک مثال استفاده از نانوذرات TiO_2 به منظور جلوگیری از تماس غذا با هوا و رطوبت است. محدودی که مدیریت غذا و دارو^۲ (FDA) برای TiO_2 بر مبنای وزن آن تعیین کرده است، ممکن است خطرات بالقوه نانوذرات TiO_2 را به اندازه کافی در نظر نگیرد. شاخص‌های محدودکننده در ارزیابی مخاطرات فناوری نانو عدم زیست دسترسی زیستی و سینتیک^۳ سمیت نانومواد می‌باشند. هرچند بعضی از نانومواد مهندسی شده توانایی آسیب رساندن به سلامت انسان را دارند، در حال حاضر اینکه شواهد علمی کافی برای به کار بردن اصول احتیاطی برای همه کاربردهای فناوری نانو غذا وجود دارد یا نه، نامشخص است. دانش کافی باید درباره اینکه چطور فرآیندهایی بر پایه نانومواد می‌توانند بر سلامت انسان اثر بگذارند باید ایجاد گردد. اطلاعاتی درباره نوع نانومواد به کار برده شده و ادعایی که درباره اثر آن‌ها وجود دارد برای پایه‌گذاری هر نوع قانونی در این زمینه برای

محافظت از سلامت مصرف‌کنندگان الزامی است [۱۴]. امروزه هیچ پیش‌نویس یا استاندارد توافق شده بین‌المللی برای نانومواد وجود ندارد. در واقع توافق اطلاعات در این زمینه بدون در نظر گرفتن اندازه ذرات بوده و بعضی نانومواد مثل نانورس و یا اکسید فلزات ممکن است مجاز شمرده شوند با وجود اینکه دقیقاً در ساختارهایی با اندازه نانو نباشند. آمریکا و اروپا مثالی از قدرت‌های اجرایی هستند که برای اولین بار قانون‌گذاری فناوری نانو را در زمینه غذا آغاز نموده‌اند. در قوانین اروپا، توافقی برای توسعه قانون‌های مشخص با در نظر گرفتن نانومواد به عنوان دسته جداگانه‌ای از مواد تا سال (۲۰۰۹) وجود نداشت [۱۷]. یک مؤسسه علوم و صنایع غذایی وابسته به دانشگاه مشیگان^۴ در آمریکا پیشنهاد کرده است تا زمانی که ایمنی نانومواد تأیید گردد، نانومواد باید به عنوان مواد آسیب‌رسان بالقوه برای انسان در نظر گرفته شوند. همچنین مرجع قانون‌گذاری ایمنی غذای اروپا^۵ (EFSA) بیان کرده است که نوعی ارزیابی مخاطره محتاطانه مورد به مورد برای آن دسته از موادی که اندازه آن‌ها به صورت عمدی برای رسیدن به خواص عملکردی، فیزیکی و شیمیایی متفاوت مهندسی شده است باید صورت بگیرد تا زمانی که اطلاعات بیشتری درباره دانش و فناوری نانو به دست آید. همچنین دستورالعملی برای ارزیابی مخاطرات نانومواد در رابطه با مصارف مربوط به غذا فراهم کرده است که الزاماتی برای شناسایی، تشخیص و تعیین ویژگی نانومواد گزارش می‌کند [۱۸]. در صورتی که عدم مهاجرت نانومواد بعد از فرمولاسیون^۶ و همچنین تغییر شکل آن‌ها قبل و یا بعد از هضم را نتوان اثبات کرد، مطالعات سم‌شناسی در آزمایشگاه و در بافت زنده مورد نیاز است [۱۹].

در آمریکا، مراجع زیادی مسئول محصولاتی بر پایه فناوری نانو هستند. در سال (۲۰۰۶)، مدیریت غذا و دارو

4- Michigan
5- European Food Safety Authority
6- Formulation

1- Generally Recognized as Safe
2- Food and Drug Administration
3- Kinetics

مهاجرت بر پایه دریافت قابل تحمل روزانه^۳ (TDI) و دریافت قابل پذیرش روزانه^۴ (ADI) هستند که توسط مرجع قانون‌گذاری ایمنی غذای اروپا^۵ (EFSA) برای مواد مطالعه شده پیشنهاد شده‌اند؛ با این فرض که یک فرد ۶۰ کیلوگرمی در طول زندگی‌اش روزانه ۱ کیلوگرم غذای بسته‌بندی شده در مواد پلاستیکی که بیشترین مقدار تأیید شده ترکیب خاصی را دارند، مصرف کند [۵]. قانون جدید 450/2009/EC، علاوه بر الزامات کلی که توسط قانون 1935/2004/EC برای استفاده ایمن بیان شده است، دستوراتی را برای مواد فعال و هوشمندی که در بسته‌بندی به کار گرفته می‌شوند در بردارد. این قانون برای مواد جدید بسته‌بندی غذا به کار گرفته می‌شود و به اندازه کافی وسیع است که نانومواد را نیز دربرمی‌گیرد. طبق این قانون، ماده فعال باید شناسایی شده و بیشترین مقداری که آزاد می‌شود مشخص باشد. مواد مجاز شمرده شده اجازه دارند که در حد مشخصی از مواد در تماس با غذا آزاد شوند و تغییراتی در ترکیب غذا یا خواص حسی آن به وجود آورند. محدودیت‌هایی که در قانون برای افزودنی‌های پلاستیکی در رابطه با حدود مهاجرت آن به مواد غذایی وجود دارد، برای نانومواد هم قابل اجراست. قوانین موجود تمایزی بین مواد تولید شده به وسیله فناوری نانو، از سایر موادی که به صورت متداول با روش‌های ساخت استاندارد تولید می‌شوند، قائل نمی‌شود و نانومواد که برای ساخت مواد بسته‌بندی بر پایه نانو به کار می‌روند، به عنوان ترکیب شیمیایی جدیدی ارزیابی نمی‌شوند. در نتیجه محصولات این فناوری به صورت کلی به وسیله ترکیبی از قوانین اروپا و کنترل‌های ویژه‌تر برای مواد مشخص مورد بررسی قرار می‌گیرند. با این وجود، به دلیل تفاوت در ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی، حد ایمن بیشینه مهاجرت برای ترکیبات میکرومتری نباید برای معادل‌های آن‌ها با اندازه نانو به کار رود. علاوه بر این، زمانی که از نانومواد استفاده می‌شود، نه تنها مقدار استفاده

(FDA) دیدگاه قانونی را برای محصولاتی بر پایه نانو که متضمن ایمنی باشند ایجاد نمود. هر چند چهارچوب قانون‌گذاری مدیریت غذا و دارو (FDA) به واسطه پیچیدگی این فناوری مورد چالش قرار می‌گیرد و تحقیقات در زمینه ارزیابی مخاطرات نانومواد با سرعت کافی برای کنترل پیشرفت فناوری نانو پیش نمی‌روند. این مسئولیت مدیریت غذا و دارو (FDA) است که ایمنی محصولاتی بر پایه نانو را تضمین کند. از زمان پیدایش مدیریت غذا و دارو (FDA)، ارزیابی مورد به مورد محصولات در استاندارد قرار گرفته و همچنان ادامه دارد. با این وجود از آنجایی که هیچ الزام برجسب‌گذاری در این مورد وجود ندارد، کنترل محصولاتی بر پایه نانو و ارزیابی ایمنی آن‌ها برای (FDA) دشوار است [۱۷].

۹- ارزیابی مخاطرات و تطابق بسته‌بندی‌های غذایی دارای نانومواد

قوانین اروپا تمام ترکیباتی را که در بسته‌بندی‌های مواد غذایی به کار می‌رود را کنترل می‌کند. این قوانین برای تطابق همه مواد در تماس با غذا که قابلیت مهاجرت به غذا را داشته به کار می‌رود و مختص به نوع ویژه‌ای از ترکیب سازنده از جمله نانومواد نمی‌شود. هر ماده‌ای که به صورت مستقیم یا غیرمستقیم در تماس با غذا قرار می‌گیرد باید بی‌اثر باشد تا از انتقال آن‌ها به غذا در مقادیر غیرقابل پذیرش که باعث آسیب به سلامت انسان شده و یا خواص حسی غذا را تغییر داده و باعث خراب شدن آن می‌شود، جلوگیری شود. برای محافظت از سلامت مصرف‌کننده و پیشگیری از تقلب‌های غذایی، دو حد مهاجرت برای مواد پلاستیکی تعریف شده است. یک حد مهاجرت کلی^۱ (OML) مواد مجاز پلاستیک‌های در تماس با غذا که عبارت از، ۶۰ mg از آن ماده بر کیلوگرم غذای بسته‌بندی شده یا شبیه‌ساز غذایی در هر شرایطی است. دوم، حد مهاجرت ویژه^۲ (SML) که از مهاجرت سطوحی از موادی که مخاطرات بالقوه سمی دارند به غذا یا شبیه‌سازهای غذایی جلوگیری می‌کند. حدود

3- Tolerable Daily Intake
4- Acceptable Daily Intake
5- European Food Safety Authority

1- Overall Migration Limit
2- Specific Migration Limit

از عنصر باید در نظر گرفته شود، بلکه میزان مهاجرت ویژه ذرات هم باید در نظر گرفته شود. به دلیل سطح خیلی توسعه یافته نانومواد، مسائل ویژه سم‌شناسی می‌توانند مطرح شوند و مهاجرت نانومواد که بستگی به ساختار و اندازه آن‌ها دارد باید از نظر کمی مشخص شود. برای اینکه این دو قانون برای همه مخاطرات بالقوه نانومواد معتبر شوند، آزمون‌های کنش گرایانه^۱ برای تعیین مخاطرات آن‌ها و تعیین پاسخ‌هایی که در هر دژ می‌دهند مورد نیاز است. همچنین باید مشخص شود که روش‌های آزمون حاضر برای نانومواد مؤثر هستند یا نه؛ و نیز امکان مهاجرت نانومواد به غذا باید در نظر گرفته شود. طبق قوانین اتحاد اروپایی^۲ (EU)، نانو مواد در تماس با غذا باید به لحاظ سمیت بالقوه مورد ارزیابی قرار بگیرند و در حال حاضر حدود مهاجرت کلی و ویژه آن‌ها تعریف نشده است. یک مثال از کسب مجوزهای لازم قبل از بازار^۳، استفاده از نانوذرات تیتانیوم نیتريد^۴ (TiN) در بطری‌های پلی‌اتیلن ترفتالات^۵ (PET) بود. پنل علمی (EFSA) در ارتباط با مواد در تماس با غذا، نظر مثبتی درباره ایمنی این ماده اتخاذ کردند که نانو ذرات (TiN) کاملاً نامحلول و به لحاظ شیمیایی در همه غذاها و شبیه‌سازهای غذایی بی‌اثر هستند. این ترکیب در سطوحی تا ۲۰ppm در بطری‌های پت به کار گرفته شد و هیچ نشانه‌ای از مهاجرت پلاستیک‌ها را نشان نداد. بنابراین (TiN) مخاطره سمی برای مواد غذایی محسوب نمی‌شود و اطلاعات سم‌شناسی برای کاربردهای آن‌ها مورد نیاز نیست [۱۲]. در مورد نانومواد که به صورت عمدی با هدف رهایش اضافه می‌شوند (مثلاً در بسته‌بندی‌های ضد میکروبی هوشمند)، نانومواد باید به عنوان یک افزودنی غذایی و نه جزئی از بسته‌بندی در نظر گرفته شوند و از جنبه دیگری مورد کنترل واقع شوند. برچسب‌گذاری چنین بسته‌بندی‌هایی باید با دستورات افزودنی‌های غذایی منطبق باشد [۱۴].

۱۰- نتیجه گیری

به صورت خلاصه، در حال حاضر مسائل زیر باید برای ارزیابی کامل ایمنی نانوکامپوزیت‌ها در بسته‌بندی غذا مطرح شوند:

- ۱- خواص کامل فیزیکوشیمیایی نانوذرات تولید شده؛
- ۲- روش‌هایی برای تعیین و ارزیابی احتمال مهاجرت نانوذرات؛
- ۳- روش‌های پایدار و مناسب برای شناسایی، تعیین ویژگی و کمی‌سازی نانومواد در ماتریس‌های پیچیده غذایی؛
- ۴- رابطه متقابل بین ویژگی‌های نانوذرات و سمیت آن‌ها؛
- ۵- اطلاعات درباره سنتیک سم و نانوذرات بعد از مصرف آن‌ها و روابط دز- پاسخ سموم [۱۸].

۱۱- منابع

1. Alexandre M, Dubois P. (2000). "Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials." *Materials Science and Engineering: R: Reports*; 28(1):1-63.
2. Aminabhavi T, Balundgi R, Cassidy P. A91990). "Review on biodegradable plastics." *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 29(3):235-62.
3. Avella M, De Vlieger JJ, Errico ME, Fischer S, Vacca P, Volpe MG. (2005). "Biodegradable starch/clay nanocomposite films for food packaging applications." *Food chemistry*.;3(3):467-474.
4. Bradley EL, Castle L, Chaudhry Q. (2011). "Applications of nanomaterials in food packaging with a consideration of opportunities for developing countries." *Trends in food science & technology*.22(11):604-10.

- 1- Pro Active
- 2- European Union
- 3- Pre- Market
- 4- Titanium Nitride
- 5- Polyethylene Terephthalate

- European Food Research and Technology.234(4):713-22.
14. Cushen M, Kerry J, Morris M, Cruz-Romero M, Cummins E. (2012). "Nanotechnologies in the food industry—Recent developments, risks and regulation." Trends in Food Science & Technology.24(1):30-46.
 15. Crosby NT. "Food packaging materials. Aspects of analysis and migration of contaminants:" Applied Science Publishers Ltd.; 1981.
 16. Luo PG, Stutzenberger FJ. 4 (2008). "Nanotechnology in the Detection and Control of Microorganisms." Advances in applied microbiology. 63(2):145-81.
 17. Sandoval BM. (2009). "Perspectives on FDA's regulation of nanotechnology: emerging challenges and potential solutions." Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 8(4):375-93.
 18. Bouwmeester H, Dekkers S, Noordam MY, Hagens WI, Bulder AS, De Heer C, et al. (2009). "Review of health safety aspects of nanotechnologies in food production." Regulatory toxicology and pharmacology. 53(1):52-62.
 19. Morones JR, Elechiguerra JL, Camacho A, Holt K, Kouri JB, Ramirez JT, et al. (2005). "The bactericidal effect of silver nanoparticles." Nanotechnology. 16(10):2346.
 5. Huang J-Y, Li X, Zhou W. (2015). "Safety assessment of nanocomposite for food packaging application." Trends in Food Science & Technology.45(2):187-99.
 6. Koo JH. (2006). "Polymer nanocomposites: McGraw-Hill Professional Pub."
 7. Liu J-f, Yu S-j, Yin Y-g, Chao J-b. (2012). "Methods for separation, identification, characterization and quantification of silver nanoparticles." TrAC Trends in Analytical Chemistry.33:95-106.
 8. Munro IC, Houghton LA, Lynch BS, Tafazoli S. (2009). "Technological challenges of addressing new and more complex migrating products from novel food packaging materials." Food Additives and Contaminants.26(12):1534-46.
 9. Ray S, Quek SY, Easteal A, Chen XD. (2006). "The potential use of polymer-clay nanocomposites in food packaging." International Journal of Food Engineering.2(4).
 10. Schmidt B, Katiyar V, Plackett D, Larsen EH, Gerds N, Koch CB, et al. (2011). "Migration of nanosized layered double hydroxide platelets from polylactide nanocomposite films." Food Additives & Contaminants: Part A. 28(7):956-66.
 11. Song H, Li B, Lin Q-B, Wu H-J, Chen Y. (2011). "Migration of silver from nanosilver-polyethylene composite packaging into food simulants." Food Additives & Contaminants: Part A. 28(12):1758-62.
 12. Tiede K, Boxall AB, Tear SP, Lewis J, David H, Hassellöv M. (2008). "Detection and characterization of engineered nanoparticles in food and the environment." Food Additives and Contaminants. 25(7):795-821.
 13. Torres A, Guarda A, Moraga N, Romero J, Galotto M. (2012). "Experimental and theoretical study of thermodynamics and transport properties of multilayer polymeric food packaging."

آدرس نویسنده

تهران- شهرک قدس (غرب)- بلوار شهید
 فرحزادی- خیابان ارغوان غربی- پلاک ۷-
 انستیتو تحقیقات تغذیه و صنایع غذایی کشور-
 دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی.