

مزایا، چالش‌ها و ملاحظات ایمنی کاربرد فناوری نانو در صنعت آرایشی و بهداشتی: مرور تحلیلی

زهرا خیاط سرکار^۱

بهروز اکبری آدرگانی^{۲*}

فرناز نصری^۱

محمود آل‌بویه^۱

۱. مرکز تحقیقات غذا و دارو، سازمان غذا و دارو، وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، تهران، ایران
۲. مرکز تحقیقات سلامت آب، سازمان غذا و دارو، وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، تهران، ایران

نویسنده مسئول:

بهروز اکبری آدرگانی

تهران، خیابان انقلاب، خیابان فخر رازی
پست الکترونیک:

b.akbari@fda.gov.ir

تعارض منافع: اعلام نشده است.

فناوری نانو طی دو دهه اخیر به‌عنوان یکی از تحول‌آفرین‌ترین دستاوردهای علم مواد، نقش برجسته‌ای در دگرگونی صنعت آرایشی و بهداشتی ایفا کرده است. کاهش اندازه ذرات به مقیاس نانومتری با افزایش سطح ویژه و بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، امکان ارتقای نفوذ پوستی، افزایش پایداری ترکیبات فعال و فراهم‌سازی رهایش هدفمند مواد مؤثره را فراهم ساخته و به تولید فرآورده‌هایی با کارایی بالاتر انجامیده است. با این حال، هم‌زمان با گسترش کاربرد این فناوری، نگرانی‌هایی درخصوص ایمنی زیستی، سمیت بالقوه و پیامدهای زیست‌محیطی نانوذرات مطرح شده که ضرورت ارزیابی دقیق را برجسته می‌سازد. این رو، این مقاله با هدف ارائه تحلیلی جامع از مزایا، محدودیت‌ها و ملاحظات ایمنی کاربرد فناوری نانو در صنعت آرایشی و بهداشتی تدوین گردیده است. در این مطالعه مروری تحلیلی، مقالات و منابع منتشرشده در پایگاه‌های معتبر علمی طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بهره‌گیری از نانو ساختارهایی مانند نانولیپوزوم‌ها، نانومولسیون‌ها، نانوذرات فلزی و نانوذرات لیپیدی در فرمولاسیون محصولات آرایشی، ضمن بهینه‌سازی عملکرد و افزایش زیست‌فراهمی، ظرفیت قابل توجهی برای نوآوری در این صنعت ایجاد کرده است. در مقابل، شواهدی مبنی بر القای استرس اکسیداتیو، پاسخ‌های التهابی و چالش‌های تنظیم‌گری در زمینه ارزیابی ریسک بلندمدت گزارش شده است. کاربرد فناوری نانو در صنعت آرایشی و بهداشتی دارای ظرفیت نوآورانه و ارزش افزوده بالاست؛ با این وجود، تضمین ایمنی مصرف‌کنندگان مستلزم انجام مطالعات سم‌شناسی بلندمدت و تدوین چارچوب‌های نظارتی شفاف است. ایجاد توازن میان نوآوری صنعتی و ملاحظات سلامت عمومی، شرط اساسی توسعه پایدار این فناوری محسوب می‌شود.

کلیدواژه‌ها: فناوری نانو، نانوذرات، صنعت آرایشی و بهداشتی، سمیت، مقررات نظارتی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۷ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰

پوست و زیبایی؛ زمستان ۱۴۰۴، دوره ۱۶ (۴): ۲۴۷-۲۶۷

مقدمه

یکی از پیشرفته‌ترین عرصه‌های علمی و فناورانه توانسته نقش بی‌سابقه‌ای در تحول صنعت آرایشی و بهداشتی ایفا کند؛ این فناوری با طراحی و مهندسی مواد در مقیاس ۱۰۰-۱ نانومتر موجب بروز خواص فیزیکی، شیمیایی و زیستی متمایزی می‌شود که در مقیاس‌های بزرگ‌تر قابل دستیابی نیست و زمینه‌ساز نسل جدیدی از فرمولاسیون‌ها با کارایی بهبودیافته،

در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های شتابان در علوم مواد و فناوری‌های نوین، به‌ویژه فناوری نانو، چشم‌انداز صنایع مختلف را به‌طور بنیادین دگرگون ساخته است؛ به‌گونه‌ای که نانوفناوری امروزه نه‌تنها به‌عنوان یک رویکرد علمی پیشرفته، بلکه به‌عنوان بستری راهبردی برای خلق ارزش افزوده و نوآوری صنعتی شناخته می‌شود. در سال‌های اخیر نیز، فناوری نانو به‌عنوان

پایداری بالا و عملکرد چندمنظوره گردیده است، به نحوی که طیف گسترده‌ای از نانوحامل‌ها نظیر لیپوزوم‌ها، نانومولسیون‌ها، نانوکپسول‌ها و ذرات لیپیدی/پلیمری در محصولات مرطوب‌کننده، ضدآفتاب، ضدپیری و ترمیم‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد تا نفوذ فعال‌های زیستی به لایه‌های عمقی پوست، رهایش کنترل‌شده و افزایش زیست‌فراهمی را تسهیل نماید؛ این پیشرفت‌ها نه تنها اثرات درمانی و زیبایی را ارتقا داده، بلکه امکان توسعه محصولاتی هدفمند برای مراقبت از مو، ناخن، لب و حتی درمان‌های تخصصی پوستی را فراهم آورده است، به گونه‌ای که در مطالعات جدید کاربرد نانوفناوری در ماسک‌های پوستی، کرم‌های ضدچروک و فرمولاسیون‌های ضدالتهاب به‌طور چشمگیری بهبود یافته و رضایت مصرف‌کننده افزایش یافته است.

همزمان، توسعه این فناوری با چالش‌های پیچیده‌ای در زمینه ایمنی و تنظیم‌گری همراه است؛ زیرا اندازه فوق‌العاده کوچک و سطح ویژه زیاد نانوذرات می‌تواند نفوذ بی‌رویه به پوست سالم، واکنش‌های آلرژیک، استرس اکسیداتیو، التهاب و حتی خطرات زیست‌محیطی در صورت ورود به چرخه‌های طبیعی را به دنبال داشته باشد، که به دلیل رفتار متفاوت نانومواد در بدن و محیط نسبت به حالت‌های بزرگ‌تر، نیازمند ارزیابی‌های سم‌شناسی دقیق، استانداردسازی علمی، سیاست‌های تنظیم‌گری قوی و شفافیت در برچسب‌گذاری محصولات است تا هم ایمنی مصرف‌کنندگان تضمین شود و هم اعتماد عمومی به این فناوری نوظهور تقویت گردد. از دیدگاه بازار و نوآوری، تحلیل‌های صنعتی نشان می‌دهد که محصولات مبتنی بر نانو حامل‌ها و نانومواد در حال تبدیل شدن به استاندارد آینده صنعت آرایشی و بهداشتی، با رشد قابل توجه تقاضا و سرمایه‌گذاری در توسعه فرمولاسیون‌های تخصصی هستند و این روند نوآورانه، در کنار تلاش‌های علمی برای آگاهی‌رسانی

بهرتر و سیاست‌گذاری مؤثر، نویدبخش آینده‌ای است که در آن فناوری نانو بتواند ضمن ارتقای عملکرد محصولات، سلامتی مصرف‌کنندگان و حفاظت از محیط زیست را نیز به‌طور متوازن و مسئولانه تضمین نماید^۱. هدف از انجام این پژوهش، ارائه تحلیلی نظام‌مند و جامع از ابعاد چندگانه کاربرد فناوری نانو در صنعت آرایشی و بهداشتی با تمرکز هم‌زمان بر ظرفیت‌های نوآورانه، چالش‌های فنی و ملاحظات ایمنی آن است؛ به گونه‌ای که ضمن تبیین نقش نانوساختارها در ارتقای کارایی، پایداری و هدفمندسازی ترکیبات فعال، مخاطرات بالقوه زیستی و زیست‌محیطی ناشی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد این مواد در مقیاس نانو نیز به صورت انتقادی بررسی شود. این مطالعه می‌کوشد با رویکردی تحلیلی - مروری، شکاف موجود میان توسعه فناورانه و الزامات ایمنی را شناسایی کرده و با تلفیق شواهد علمی، چارچوبی مفهومی برای ارزیابی ریسک، بهینه‌سازی فرمولاسیون و سیاست‌گذاری مسئولانه در این حوزه پیشنهاد دهد؛ به نحوی که مسیر بهره‌برداری هوشمندانه، ایمن و پایدار از فناوری نانو در محصولات آرایشی و بهداشتی هموار گردد.

صنعت آرایشی و بهداشتی

عموماً ماده‌ای که برای بهبود پوست استفاده می‌شود، لوازم آرایشی نامیده می‌شود. لوازم آرایشی مواد خارجی هستند که در خارج از بدن استفاده می‌شوند. سازمان غذا و داروی آمریکا (FDA) لوازم آرایشی را این گونه توصیف می‌کند: «ذراتی که برای تمیزکردن، زیباسازی، افزایش جذابیت یا تنظیم ظاهر، روی بدن انسان یا هر قسمتی از آن استفاده می‌شوند». در دنیای مدرن، لوازم آرایشی به عنوان یک ضرورت در نظر گرفته می‌شوند. آنها نه تنها مردم را به سمت خود جذب می‌کنند، بلکه اثرات فیزیولوژیکی نیز دارند. این لوازم آرایشی در طول دو تا چهار دهه گذشته توجه زیادی را از سوی مردان و زنان به خود جلب کرده

مهمی در ارتقای کارایی فرآورده‌های آرایشی ایفا می‌کنند. کاهش اندازه ذرات به مقیاس نانو موجب تغییر در ویژگی‌هایی نظیر رنگ، شفافیت، فعالیت نوری، واکنش‌پذیری شیمیایی و خواص مکانیکی می‌شود؛ برای مثال، نانوذرات اکسید فلزی نظیر دی‌اکسید تیتانیوم و اکسید روی در ابعاد نانومتری، ضمن حفظ توانایی جذب و پراکنش پرتوهای فرابنفش، شفافیت ظاهری مطلوب‌تری بر روی پوست ایجاد می‌کنند که این امر منجر به پذیرش بیشتر مصرف‌کنندگان در محصولات ضدآفتاب شده است. افزون بر این، انطباق اندازه نانو ساختارها با ابعاد بیولوژیکی اجزای سلولی پوست، امکان برهم‌کنش مؤثرتر با ساختارهای اپیدرمی و در برخی موارد رهایش هدفمند مواد مؤثره را فراهم می‌سازد.

کاربرد نانومواد در فرمولاسیون‌های آرایشی عمدتاً با اهدافی نظیر افزایش نفوذ پوستی، کنترل سینتیک آزادسازی مواد فعال، بهبود بافت و خواص رئولوژیک محصول، افزایش ماندگاری اثر و ارتقای ثبات فیزیکوشیمیایی دنبال می‌شود. نانوحامل‌هایی مانند لیپوزوم‌ها، نانوامولسیون‌ها، نانوکپسول‌ها و نانوذرات لیپیدی جامد، امکان محافظت از ترکیبات زیست‌فعال در برابر تخریب محیطی و رهایش تدریجی آن‌ها در محل اثر را فراهم می‌کنند. همچنین نسبت سطح به حجم بالای نانومواد می‌تواند به افزایش تماس مؤثر با سطح پوست و بهبود یکنواختی پخش فرآورده منجر شود که از منظر کیفی و حس‌ی (sensorial properties) در پذیرش محصول اهمیت دارد. براساس گزارش‌های اخیر، نانومواد مورد استفاده در محصولات آرایشی و بهداشتی عموماً به دو گروه اصلی شامل نانوذرات آلی (نظیر سیستم‌های لیپیدی و پلیمری) و نانوذرات معدنی (نظیر اکسیدهای فلزی و فلزات نجیب) تقسیم می‌شوند که هر یک بسته به ماهیت ساختاری و شیمی سطحی خود، کاربردها و ملاحظات ایمنی متفاوتی دارند (شکل ۲). با توجه به

است؛ اما طبق گزارش‌ها، مصرف آن از ۱۰۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح از روغن‌ها، کرم‌ها و پمادها برای دستیابی به بهداشت و محافظت از پوست خود در برابر آفتاب داغ و بادهای خشک استفاده می‌کردند. نقاشی‌های مقبره، نقاشی‌های دیواری و موزاییک‌ها همگی نشان می‌دهند که استفاده از لوازم آرایشی در بین مردم در دوران باستان بسیار گسترده بوده است.

کرم‌ها و پودرها پرکاربردترین لوازم آرایشی هستند و متأسفانه، انسان‌ها در طول تاریخ، بنا به گزارش‌ها، سلامت و ایمنی خود را در تلاش برای زیبایی با بسیاری از لوازم آرایشی خانگی سمی قربانی کرده‌اند. در دهه ۱۸۰۰، زنان از مواد سمی مانند سرب، زالو، آرسنیک و جیوه استفاده می‌کردند تا ظاهری رنگ‌پریده به خود بدهند، در حالی که در دوران باستان ظاهری زیبا به نظر می‌رسید. بسیاری از این مصرف‌کنندگان لوازم آرایشی، هزینه گزافی را پرداخت می‌کردند.^۲

فناوری نانو در صنعت آرایشی و بهداشتی

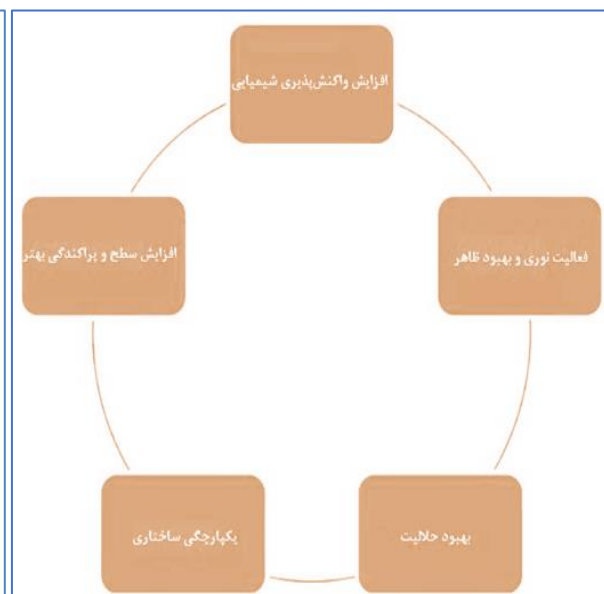
در نانوفناوری، طراحی و مهندسی مواد در مقیاس ۱-۱۰۰ نانومتر انجام می‌شود؛ محدوده‌ای که در آن، رفتار فیزیکی، شیمیایی و زیستی مواد به‌طور معناداری با مقیاس‌های میکرو و ماکرو تفاوت دارد. در این ابعاد، نسبت سطح به حجم به‌طور چشمگیری افزایش یافته و پدیده‌هایی نظیر اثرات کوانتومی، تغییر انرژی سطحی و اصلاح ویژگی‌های بین‌سطحی، سبب بروز خواص عملکردی متمایز می‌گردند. همین ویژگی‌ها موجب شده است فناوری نانو به‌طور گسترده در صنعت آرایشی و بهداشتی به‌کار گرفته شود و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین راهبردهای نوآورانه در توسعه فرآورده‌های پوستی و زیبایی مطرح گردد. مطالعات مروری اخیر نشان داده‌اند که نانو ساختارها به دلیل افزایش حلالیت ترکیبات کم‌محلول، بهبود پایداری شیمیایی مواد حساس به نور و اکسیداسیون، ارتقای زیست‌فراهمی و تسهیل نفوذ کنترل‌شده از سد لایه شاخی، نقش

Plentitude (Revitalift لورآل، پاریس)، یک کرم ضدچروک، از نانوکپسول‌های پلیمری برای رساندن رتینول به ناحیه پوستی پوست استفاده کرد. و سپس، هیجان برای نانومواد آغاز شد. در دهه ۲۰۰۰، برندهایی از جمله Caudalie، Pureology، Estée Lauder، Johnston & Johnston و Procter & Gamble همگی شروع به عرضه محصولات نانوآرایشی به عموم مردم کردند که در شکل ۳ قابل مشاهده است. استی لادر (یک تولیدکننده بزرگ لوازم آرایشی و بهداشتی) در سال ۲۰۰۶ با طیف وسیعی از محصولات حاوی «نانوذرات» وارد «بازار لوازم آرایشی و بهداشتی نانو» شد، لورآل، بزرگترین شرکت لوازم آرایشی و بهداشتی جهان در سال ۲۰۱۱ حدود ۹۲۷ میلیون دلار به تحقیقات آرایشی و بهداشتی و پوستی اختصاص داد. بازار جهانی محصولات آرایشی در سال ۲۰۱۷، ارزشی معادل ۵۳۲ میلیارد دلار داشت و طبق انتظار با رشد سالیانه ۷ درصد در سال ۲۰۲۳ به ۸ میلیارد دلار رسید.

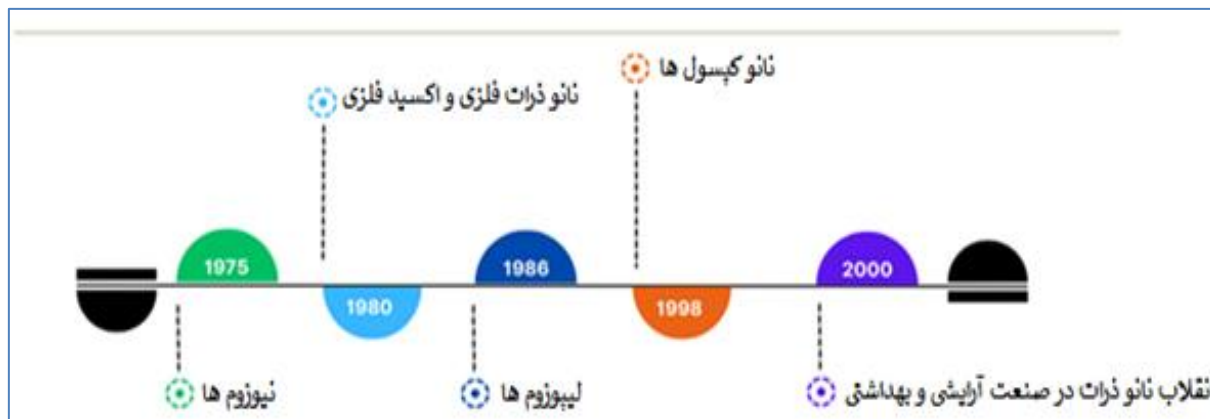
گسترش روزافزون استفاده از این ساختارها، شناخت دقیق ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، رفتار زیستی و پروفایل ایمنی آن‌ها، پیش‌نیاز توسعه مسئولانه و پایدار فناوری نانو در حوزه پوست و زیبایی محسوب می‌شود.^۳ بررسی‌های اخیر نشان داده که تولیدکنندگان بزرگ لوازم آرایشی اکنون از مواد نانومقیاس در محصولات مختلف خود استفاده می‌کنند^{۴-۷}. طبق گزارش‌ها، نانوآرایشی‌ها در سال ۱۹۷۵ آغاز شد. لانکوم (لورآل، پاریس) «نیوزوم‌ها» را به‌عنوان یک حامل نانومواد که پتانسیل افزایش نفوذ محصول به پوست را نشان می‌داد، ثبت اختراع کرد. در دهه ۱۹۸۰، اولین اختراع ثبت شد که ادعا می‌کرد نانوذرات ZnO و TiO_2 توانایی جذب اشعه فرابنفش را دارند. در سال ۱۹۸۶، دیور ساینس (لویی ویتون موئت هنسی، پاریس) سرم ضد پیری «کچر» را به بازار عرضه کرد که سوسپانسیونی از لیپوزوم‌های ۱۰۰ نانومتری در مخلوطی از ژل هیالورونیک اسید و کاربومر بود. عرضه بزرگ بعدی نانومواد در لوازم آرایشی تقریباً یک دهه دیگر طول کشید، زمانی که



شکل ۲: گروه‌های اصلی نانومواد مورد استفاده در فرمولاسیون‌های آرایشی.



شکل ۱: ویژگی‌های نانو مواد.



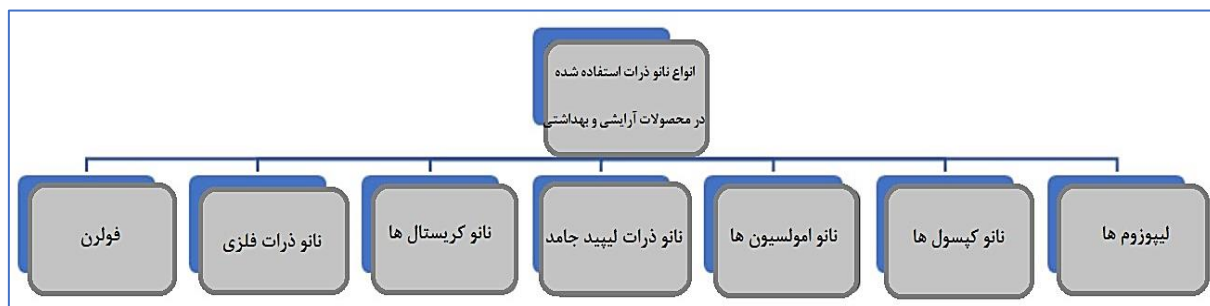
شکل ۳: جدول زمانی معرفی تجاری فرمولاسیون های نانو.

حلالیت بهتر، تطبیق اندازه مواد آرایشی با ساختارهای بیولوژیکی سلول های پوست و در نتیجه سهولت تعامل محصولات را تضمین می کنند.

نانومواد مورد استفاده در لوازم آرایشی بسیار زیاد هستند و خواص منحصر به فرد آن ها متفاوت است. برخی از این مواد به همراه ترکیب، خواص و کاربردهای آن ها در زیر مورد بحث قرار گرفته است. رایج ترین نانومواد که در محصولات آرایشی و بهداشتی استفاده می شوند، در شکل ۴ نشان داده شده است.

- ♦ لیپوزوم ها (برای جذب بیشتر توسط پوست)؛
- ♦ نانومولسیون ها (به دلیل توانایی آن ها در افزایش عمر مفید محصولات مراقبت شخصی)؛
- ♦ نانو کپسول ها (برای رهاسازی کنترل شده آن ها)؛
- ♦ نانوذرات لیپیدی جامد (برای مسدود کردن افزایش یافته اشعه فرابنفش)؛
- ♦ نانوکریستال ها (برای عبور موثرتر از پوست)؛
- ♦ نانوذرات فلزی (به دلیل خواص ضدباکتریایی

با توجه به امکانات بسیار زیادی که با فناوری نانو قابل دستیابی است، به کارگیری این علم در لوازم آرایشی به معنای تولید محصولات آرایشی با ظرافت، ایجاد جذابیت و دوام در رایحه عطرها، بهبود محافظت ارائه شده توسط محصولات ضد آفتاب، ایجاد رنگ مو با درخشندگی بی نظیر به موها و تولید کرم های ضد پیری است که با ارائه هیدراتاسیون طولانی مدت پوست و تقویت خاصیت ارتجاعی پوست، در برابر پیشرفت پیری مقاومت می کنند. ورود فناوری نانو به صنعت آرایشی و بهداشتی با هدف افزایش ماندگاری و بهبود ظاهری محصولات صورت گرفته است. نانومواد با توجه به امکان نفوذ بهتر مواد فعال به پوست منجر به افزایش جذب می شوند که این امر منجر به پوشش دهی بهتر و ماندگاری بیشتر شده و کاهش نیاز به استفاده مکرر از محصولات را به دنبال خواهد داشت همچنین نانو ذرات می توانند به دلیل محافظت از مواد فعال در مقابل اکسیداسیون ثبات طولانی مدت، امکان



شکل ۴: انواع نانومواد مورد استفاده در محصولات آرایشی و بهداشتی.

آن‌ها) و

♦ فولرن (به دلیل پتانسیل آن در ازبین بردن رادیکال‌های آزاد و کند کردن روند پیری).

انواع نانومواد مورد استفاده در محصولات آرایشی و بهداشتی: نانو ذرات آلی

لیپوزوم‌ها

وزیکول‌های کروی هستند که از دو لایه فسفولیپید آبگریز ساخته شده‌اند. مواد فعال آب‌دوست در هسته و مواد آبگریز در لایه دولایه لیپیدی بیرونی قرار دارند. لیپوزوم معمولاً از کلسترول و فسفولیپیدهای طبیعی یا مصنوعی در محیط آبی با نسبت مناسب لیپید به آب در حضور انرژی گرمایی تشکیل می‌شوند و در پلاسمای سلولی غشاهای وجود دارد. اندازه آن‌ها به‌طور معمول بین ۵۰۰-۲۵ نانومتر متفاوت است. خصوصیات از جمله زیست سازگاری، زیست تخریب پذیری، غیرسمی بودن و وزیکول‌های انعطاف پذیر آن‌ها را مساعد برای استفاده در انواع فرآورده‌های آرایشی و بهداشتی قرار داده است. لیپوزوم‌ها برای اولین بار در دهه ۱۹۶۰ به عنوان مرطوب کننده در کرم‌های پوست استفاده شدند. این مواد می‌توانند مواد آرایشی، اعم از آبدوست یا آبگریز را محصور کرده و محافظت کنند و محتویات آن‌ها را در هدف تعیین شده آزاد کنند از این رو، حتی مواد آرایشی کم محلول را می‌توان به وسیله لیپوزوم‌ها تحویل داد.

لیپوزوم‌ها برای کپسوله کردن و تحویل ویتامین‌هایی از جمله A، E و کاروتنوئیدها که برای تازه کردن اپیدرم پوست مورد استفاده قرار گرفته می‌گیرند و به این شکل ثبات آن‌ها را بهبود می‌بخشند. جزء اصلی لیپوزوم‌ها، فسفاتیدیل کولین می‌باشد که به دلیل خاصیت نرم و مرطوب کنندگی در مرطوب کننده‌ها برای مراقبت از پوست و شامپوهای مراقبت از مو دیده می‌شوند. لیپوزوم‌ها از نظر پایداری فیزیکی و شیمیایی محدودیت دارند که با قرارگیری چندین ماده موثر و آنتی اکسیدان حین فرمولاسیون در

پایه آبی درون لیپوزوم این مشکل مرتفع می‌گردد. نوع خاصی از لیپوزوم، فتوسوم‌ها، از اسید نوکلئیک سلول‌ها در برابر اشعه فرابنفش محافظت می‌کنند و در نتیجه خطر ابتلا به سرطان پوست را کاهش می‌دهند^{۳۸،۹}.

نانوامولسیون‌ها

امولسیون‌ها سیستم‌های متداول پراکنده مایع هستند که معمولاً از دو مایع غیرقابل اختلاط تشکیل شده‌اند که یکی در دیگری پراکنده است و به دو شکل پراکندگی کلوئیدی روغن در آب (O/W) و آب در روغن (W/O) یافت می‌شوند. قطر قطرات در این پراکندگی‌ها از چند نانومتر تا ۲۰۰ نانومتر متغیر است. نانوامولسیون‌ها به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین نانومواد مطرح بوده که در صنعت آرایشی و بهداشتی استفاده می‌شوند. کاربرد گسترده آن‌ها به خواص منحصربه‌فرد، ویژه و مطلوب آن‌ها نسبت داده می‌شود. نانوامولسیون‌ها اغلب ظرفیت بارگذاری بالاتری برای مواد فعال روغن‌دوست دارند که ممکن است در کاربردهای خاص مفید باشد. نانوامولسیون‌ها به قدری بافت ظریفی دارند که امکان اسپری روی آن‌ها وجود داشته و نسبتاً پایدار هستند. آن‌ها همچنین نفوذ خوب به پوست و قدرت آبرسانی بالا دارند. این ترکیبات قابلیت حفظ مواد موثره مانند ویتامین‌ها و آنتی اکسیدان‌ها را دارند و به‌طور گسترده به عنوان وسیله‌ای برای تحویل کنترل شده مواد فعال بیولوژیکی در لوازم آرایشی مانند لوسیون‌ها، شامپوها، مینای ناخن و نرم کننده‌های مو استفاده می‌شود همچنین در کرم‌های پوستی، برای افزایش نفوذ در پوست مواد به صورت نانوامولسیون کپسوله می‌شوند^{۱۰-۱۲}.

نانوکپسول‌ها

نانوکپسول‌ها نانوذرات پلیمری هستند که از یک پوسته و یک فضای توخالی حاوی یک هسته آبیکی یا روغنی در مرکز کپسول‌های پلیمری هستند که مواد مورد نظر در آن بارگیری شده و در برابر محیط محافظت شده و منتقل می‌شوند. به عنوان مثال رتینول

تثبیت می‌شوند تا پایداری فیزیکی و شیمیایی و فراهمی زیستی تضمین کنند. اندازه آن‌ها از ۴۰۰-۱۰ نانومتر متغیر است که از صدها تا هزاران اتم به‌صورت خوشه‌ای تشکیل شده‌اند و برای تحویل مواد فعال با حلالیت ضعیف استفاده‌شده و امکان عبور مؤثر این مواد از پوست را ایجاد می‌کند. مساحت سطح بزرگ و اندازه افزایش یافته آن‌ها، انتشار مواد فعال را به بافت‌ها افزایش می‌دهد و زمان ماندگاری و چسبندگی را در محل اثر افزایش می‌دهد. نانوکریستال‌ها یک سیستم دارورسانی جدید برای ترکیبات زیست فعال ارائه می‌دهند و آن‌ها را به یک پیشرفت ارزشمند در زمینه فرمولاسیون‌های آرایشی و پوستی تبدیل می‌کنند.^{۱۶ و ۱۷}

انواع نانومواد مورد استفاده در محصولات آرایشی و بهداشتی: نانو ذرات معدنی

نانوذرات فلزی و نانوذرات سیلیکا

سیلیس در فرم نانو برای افزایش اثربخشی، بافت و ماندگاری محصولات مختلف استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، می‌تواند جذب را افزایش داده و به‌عنوان یک عامل ضدچسبندگی عمل کند و حتی می‌تواند برای کمک به آزادسازی ترکیبات فعال در طول زمان مورد استفاده قرار گیرد. نانوذرات سیلیکا در صنعت آرایشی و بهداشتی به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد و ممتازشان از جمله داشتن سطح آب‌دوست، هزینه نسبتاً پایین تولید، قابلیت کنترل و تنظیم سطح و شکل و اندازه، زیست‌سازگاری و پایداری بالا و بی‌خطری کاربرد وسیعی دارد. نگرانی خاص در مورد استفاده از نانوسیلیکا در لوازم آرایشی و بهداشتی وجود دارد این است که این نانوذرات ممکن است به پوست نفوذ کرده و در اندام‌های داخلی یا جریان خون قرار گیرند و اینکه ممکن است سمی باشند.

نانوذرات نقره

نانوذرات نقره حدود ۱۲ درصد از محصولات نانو را در صنعت آرایشی به خود اختصاص داده است. این نانوذرات به‌دلیل خواص ضدقارچی و اثر ضد میکروبی

با استفاده از نانوکپسول‌های پلیمری به لایه‌های عمیق تر پوست تحویل داده می‌شود. لانکوم (Lancome) یک محصول با استفاده از فناوری نانوکپسول، ساخته است که ویتامین E خالص از نظر گیاهی را برای غلبه بر شرایط جریان‌یابی لب و شل شدن پوست که ناشی از خطوط ظریف و چین و چروک است، به‌صورت ۱۰۰٪ ارائه می‌دهد. در صنعت آرایشی و بهداشتی نانوکپسول‌ها به‌دلیل توانایی‌شان در جلوگیری از تخریب ترکیبات حساس، کاهش بو و تضمین پایداری فیزیکی بالا، کاربرد پیدا می‌کنند. تکنیک‌های پلیمریزاسیون مینی‌مولسیون با کمک سورفکتانت و فرآیندهای تراکم بخار شیمیایی برای تولید نانوکپسول‌ها استفاده می‌شوند. آن‌ها آزادسازی تدریجی مواد فعال و فراهمی زیستی بهتر و سازگاری زیستی مواد فعال را فراهم می‌کنند. این نانوکپسول‌ها برای محیط زیست بی‌خطر هستند؛ زیرا در طول تجزیه آن‌ها دی‌اکسیدکربن و آب آزاد می‌شوند.^{۱۱، ۱۳، ۱۴}

نانوذرات لیپید جامد

این نانو ذرات به‌عنوان یک سیستم پراکنده تعریف می‌شوند که از لیپیدهای جامد در اندازه نانو که در فاز آبی پراکنده شده‌اند ساخته شده‌اند. درحقیقت قطرات روغنی هستند که در دمای بدن جامد بوده و توسط سورفکتانت‌ها تثبیت می‌شوند. نانوذرات لیپیدی جامد معمولاً به‌صورت کروی با قطر متوسط ۵۰-۱۰۰۰ نانومتر می‌باشند. ازجمله مزایای آن‌ها می‌توان به غیرسمی و زیست‌سازگار بودن، کنترل بر سینتیک آزادسازی مواد شیمیایی از کپسول‌ها، عدم نیاز به حلال پایداری طولانی‌مدت و فوق‌العاده بالای آن‌ها اشاره کرد. این نانوذرات می‌تواند لیپوسفر یا نانوکره بوده، به‌عنوان حامل برای مواد آرایشی استفاده شده و افزایش هیدراتاسیون پوست، فراهمی زیستی، ثبات و انسداد کنترل‌شده را به همراه داشته باشند.^{۳ و ۱۵}

نانوکریستال‌ها

نانوکریستال‌ها توسط سورفکتانت‌ها یا پلیمرها

(هرچه اندازه نانو ذرات کوچکتر، اثر ضد میکروبی قوی تر) که به دنبال تخریب دیواره سلولی باکتری ایجاد می شود در صنعت آرایشی و بهداشتی مورد توجه قرار گرفته اند. تحقیقات نشان داده است که نانوذرات نقره می توانند به طور مؤثر محصولات آرایشی را در برابر قارچ ها و باکتری ها برای مدت طولانی بدون رسوب حفظ کنند و به پایداری و طول عمر فرمولاسیون های مراقبت از پوست کمک کنند. آزادسازی طولانی مدت یون های نقره مسئول فعالیت ضد باکتریایی آن ها است و آنها را برای حفظ یکپارچگی محصول و جلوگیری از آلودگی میکروبی در فرمولاسیون های مراقبت از پوست ارزشمند می کند. اثربخشی نانوذرات نقره با کاهش اندازه آن ها به دلیل سطح تماس بیشتر، که تعامل آن ها با میکروارگانیسم ها و پوست را افزایش می دهد، افزایش می یابد. آن ها به عنوان نگهدارنده در محصولات مانند شامپو، خمیر دندان و به عنوان ضد التهاب و ضد آکنه در محصولات آرایشی کاربرد دارد. به طور کلی شکل نانوذرات و روش های تجویز آن تعیین کننده میزان سمیت آن ها است. همچنین می توان آنها را در محصولات آرایشی مختلفی مانند پاک کننده های صابونی، دستمال های مرطوب، دئودورانت ها و رژ لب ها یافت.^{۱۸-۲۰}

نانوذرات طلا

نانوذرات طلا آنتی اکسیدان هایی با رنگ قهوه ای مایل به قرمز هستند. رنگ آنها با توجه به اندازه شان تغییر می کند. با ابعاد ساختاری کوچکتر که منجر به رنگ قرمز به جای رنگ زرد طبیعی می شود. این نانوذرات در اندازه ها و اشکال مختلفی از ۴۰۰-۵ نانومتر وجود دارند و شامل نانوپوسته ها، نانوکره ها، ده وجهی ها، چهاروجهی ها، نانوخوشه ها، نانوستاره ها، نانومیله ها، نانومکعب ها، نانومثلث ها و ساختارهای شاخه دار می شوند. نانوذرات طلا به دلیل خواص منحصر به فردشان از جمله اثرات ضد قارچ و ضد باکتری، فعالیت های آنتی اکسیدانی و ضد التهابی، جوان سازی

پوست و بهبود زخم و افزایش رسانش مواد فعال، افزایش پایداری محصولات، سهولت حمل و نقل و تخلیه مواد و سنتز، زیبا و جذاب کردن در صنعت آرایشی و بهداشتی مورد توجه و استفاده قرار گرفته اند. میزان سمیت این نانوذرات تحت تأثیر اندازه ذرات، غلظت و تعداد دفعات استعمال موضعی آن ها است. علاوه بر این، نانوذرات طلا بی اثر، بسیار پایدار و زیست سازگار هستند و پتانسیل الکتروکینتیکی قوی روی سطح آن ها وجود دارد که به آن ها اجازه می دهد هنگام مخلوط شدن با کرم ها پایدار بمانند. به طور خلاصه، نانوذرات طلا طیف گسترده ای از ویژگی ها و خواص را از خود نشان می دهند که آن ها را برای دارورسانی به پوست و کاربردهای مختلف مراقبت از پوست امیدوار می کند و تحقیقات مداوم با هدف درک بیشتر پتانسیل آن ها و بهینه سازی استفاده از آنها در این زمینه ها انجام می شود. نکته قابل توجه در مورد این ذرات اینکه با تغییر اندازه، شکل و شیمی سطح نانوذرات طلا، ویژگی های الکتریکی و نوری آن ها می توانند همزمان وجود داشته باشند. نانوذرات طلا در خمیردندان هایی که پاک کننده های مؤثر دهان و سایر محصولات مراقبت شخصی را تولید می کنند، وارد شده است.^{۲۱ و ۲۳}

نانوذرات اکسید فلزی و نانوذرات اکسید روی

نانوذرات اکسید روی به طور گسترده و وسیع در محصولات آرایشی و بهداشتی مانند ضد آفتاب ها کاربرد دارند. وجود این ذرات منجر به تولید ضد آفتاب های شفاف و از نظر ظاهری زیبا با اثربخشی بالا شده است. به دلیل اینکه این نانوذرات در سطح پوست تجمع می یابند؛ اما سمیت سلولی ایجاد نمی کنند، در نتیجه استفاده مکرر از ضد آفتاب حاوی اکسید روی بی خطر بوده است.^{۲۲}

نانوذرات تیتانیوم دی اکسید

نانوذرات تیتانیوم دی اکسید در ابعاد ۴۰۰-۲۰۰ نانومتر در محصولات ضد آفتاب، کرم پودر و بالم لب کاربرد و اثربخشی بالایی دارند این نانوذرات

سطحی، هیدروکسیله کردن (فولرنول ها) یا استفاده از سیستم های حامل لیپیدی برطرف می شود. ارزیابی های سم شناسی اخیر نشان می دهد که در غلظت های مجاز و در صورت پایداری مناسب، فولرن ها از ایمنی نسبی در کاربردهای موضعی برخوردارند، هر چند بررسی های بلندمدت همچنان ضروری است.^{۲۴}

نانولوله های کربنی (Carbon Nanotubes; CNTs)

نانولوله های کربنی ساختارهای استوانه ای با قطر در مقیاس نانو هستند که به دو نوع تک دیواره (SWCNT) و چند دیواره (MWCNT) تقسیم می شوند. این نانوساختارها به دلیل استحکام مکانیکی بالا، هدایت الکتریکی و سطح ویژه زیاد، بیشتر در زمینه های مهندسی بافت و سامانه های رهایش دارو مورد مطالعه قرار گرفته اند. در صنعت آرایشی، کاربرد آن ها محدودتر و بیشتر در حوزه محصولات نوآورانه یا تحقیقات آزمایشگاهی است. برخی مطالعات امکان استفاده از CNT ها را در سیستم های انتقال هدفمند مواد فعال به لایه های عمقی پوست بررسی کرده اند. با این حال، نگرانی هایی در مورد سمیت بالقوه، القای پاسخ های التهابی و شباهت ساختاری برخی از انواع آن ها با فیبرهای آزیست مطرح شده است؛ از این رو استفاده گسترده از آن ها در محصولات مصرفی پوستی هنوز با احتیاط و محدودیت های نظارتی همراه است.

گرافن و اکسید گرافن (Graphene-Based Nanomaterials)

گرافن، ورقه ای تک لایه از اتم های کربن با آرایش شبکه ای شش ضلعی است که به دلیل خواص مکانیکی، هدایت حرارتی و ظرفیت بالای بارگذاری مولکولی مورد توجه قرار گرفته است. مشتقات آن نظیر اکسید گرافن و گرافن احیاء شده نیز در سال های اخیر در سامانه های زیستی بررسی شده اند. در حوزه آرایشی، کاربردهای بالقوه گرافن شامل تقویت اثرات آنتی اکسیدانی، افزایش پایداری فرمولاسیون و استفاده در ماسک های پوستی پیشرفته با قابلیت رسانش مواد فعال گزارش شده است. با این حال، نگرانی هایی درباره

به دلیل عدم نفوذ به اپیدرم و گردش عمومی خون در محصولات آرایشی و بهداشتی مورد توجه قرار گرفته اند.^{۲۳}

انواع نانومواد مورد استفاده در محصولات آرایشی و بهداشتی: نانوذرات بر پایه کربن

نانوذرات بر پایه کربن یکی از پیشرفته ترین و در عین حال پیچیده ترین دسته های نانومواد مورد استفاده در صنایع زیستی و آرایشی محسوب می شوند. این نانوساختارها به دلیل ویژگی های منحصر به فرد فیزیکوشیمیایی از جمله پایداری بالا، ظرفیت گسترده برهم کنش سطحی، هدایت الکتریکی مناسب، توانایی جذب گونه های فعال اکسیژن (ROS) و قابلیت اصلاح شیمی سطح، توجه ویژه ای را در فرمولاسیون محصولات مراقبت از پوست به خود جلب کرده اند. ساختارهای کربنی در مقیاس نانو می توانند به اشکال کروی، لوله ای، صفحه ای یا نقاط کوانتومی وجود داشته باشند و هر یک بسته به ویژگی های ساختاری خود، کاربردهای متفاوتی در محصولات آرایشی و بهداشتی دارند. در سال های اخیر، تمرکز تحقیقات بیشتر بر ایمنی زیستی، رفتار پوستی و اثرات اکسیداتیو این نانوساختارها معطوف شده است.

فولرن ها (Fullerenes)

فولرن ها ساختارهای کروی یا بیضوی متشکل از اتم های کربن با آرایش قفس مانند هستند که شناخته شده ترین نوع آن ها C₆₀ است. این ترکیبات به دلیل توانایی بالای خود در خنثی سازی رادیکال های آزاد، به عنوان «اسفنج های رادیکالی» شناخته می شوند و در محصولات ضد پیری، مرطوب کننده ها و سرم های آنتی اکسیدان کاربرد یافته اند. مطالعات نشان داده اند که فولرن ها می توانند از آسیب اکسیداتیو ناشی از اشعه فرابنفش جلوگیری کرده، تولید کلژن را تحریک کنند و در کاهش چین و چروک مؤثر باشند. با این حال، ماهیت آب گریز اولیه فولرن ها چالش هایی در فرمولاسیون ایجاد کرده است که امروزه با اصلاح

مزایا و معایب استفاده از فناوری نانو در صنعت آرایشی و بهداشتی

ورود فناوری‌های نوین همچون نانوتکنولوژی به صنعت آرایشی و بهداشتی مزایا و معایبی را به همراه خواهد داشت که به صورت جداگانه به آن اشاره شده است. مزایای نانوتکنولوژی که در شکل ۵ به آن اشاره شده است بزرگترین مزیت استفاده از این تکنولوژی در محصولات آرایشی، افزایش ماندگاری و ثبات آرایش است. ذرات نانو به دلیل اندازه کوچک تر خود، می‌توانند به عمق پوست نفوذ کنند و به محصول اجازه می‌دهند تا بهتر جذب شود. این امر موجب می‌شود که آرایش به مدت طولانی‌تری بدون تغییر باقی بماند و نیاز به تمدید مکرر آن کاهش یابد. با وجود تمامی مزایایی که نانوتکنولوژی در صنعت آرایشی به همراه دارد، معایب و چالش‌هایی هم به همراه دارند (شکل ۶) که ازجمله آن‌ها می‌توان به نگرانی‌هایی درخصوص ایمنی و تأثیرات بلندمدت آن بر پوست و سلامت عمومی اشاره کرد. به دلیل اندازه بسیار کوچک نانوذرات، برخی محققان نگران نفوذ این ذرات به لایه‌های عمیق تر بدن و مشکلات ایجادشده توسط آن هستند^{۲۵،۲۶}.

نقش نانومواد در غلبه بر خواص سدکنندگی پوست اهمیت در نظر گرفتن ساختار پوست در طراحی فرمولاسیون‌های حاوی نانو مواد

پوست انسان به عنوان بزرگترین عضو سیستم پوششی از سه لایه اپیدرم، درم و هیپودرم تشکیل شده است (شکل ۷). اپیدرم، خارجی‌ترین لایه پوست از سطح به سمت پایین به لایه‌های زیر تقسیم می‌شود: لایه شاخی، لایه دانه‌دار، لایه خاردار و لایه پایه تا غشای پایه. این لایه به عنوان یک مانع محافظ در برابر محرک‌های خارجی، پاتوژن‌ها و عوامل محیطی مضر عمل می‌کند؛ اما مولکول‌هایی با جرم مولکولی آستانه ۵۰۰ دالتون می‌توانند از آن عبور کنند. درم، لایه‌ای از پوست است که در زیر اپیدرم قرار دارد و از

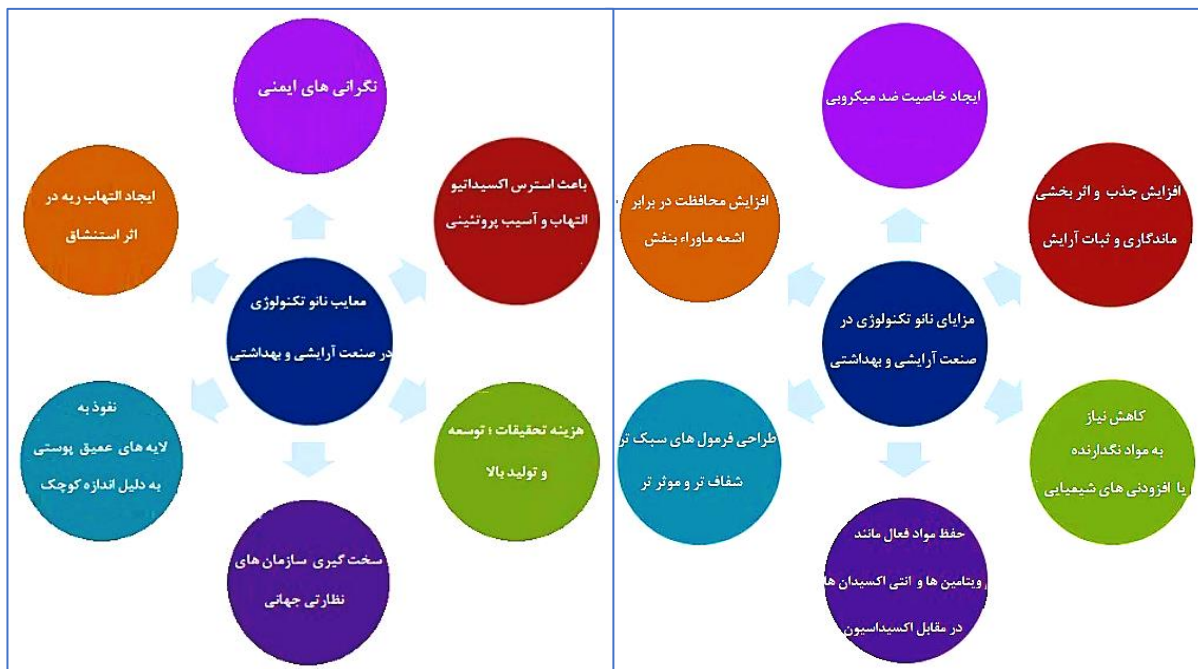
امکان تجمع زیستی، تولید استرس اکسیداتیو و اثرات سیتوتوکسیک وابسته به اندازه و بار سطحی وجود دارد که لزوم ارزیابی دقیق ایمنی را برجسته می‌کند.

نقاط کوانتومی کربنی (Carbon Quantum Dots; CQDs)

نقاط کوانتومی کربنی نسل جدیدی از نانوساختارهای فلورسنت هستند که قطر آن‌ها معمولاً کمتر از ۱۰ نانومتر است. این ذرات به دلیل زیست‌سازگاری نسبی، سمیت پایین‌تر نسبت به نقاط کوانتومی فلزی و قابلیت نشر نور، در تحقیقات زیستی و تشخیصی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در صنعت آرایشی، CQD ها می‌توانند در توسعه محصولات دارای خاصیت تصویربرداری پوستی، پایش سلامت پوست یا حتی فرمولاسیون‌های نوین با اثرات محافظتی در برابر UV نقش ایفا کنند. هرچند کاربرد تجاری گسترده آن‌ها هنوز در مراحل اولیه است؛ اما مطالعات پیش‌بالینی نتایج امیدوارکننده‌ای در زمینه ایمنی پوستی نشان داده‌اند.

ملاحظات ایمنی و چالش‌های کاربردی: نانو ذرات بر پایه کربن

اگرچه نانوذرات بر پایه کربن دارای ظرفیت‌های قابل توجهی در بهبود عملکرد محصولات آرایشی هستند؛ اما ایمنی آن‌ها به عوامل متعددی ازجمله اندازه، شکل، بار سطحی، میزان تجمع‌پذیری و نوع اصلاح شیمیایی وابسته است. برخی مطالعات نشان داده‌اند که نانوساختارهای کربنی در صورت نفوذ به لایه‌های عمقی پوست یا ورود به گردش سیستمیک می‌توانند منجر به تولید گونه‌های فعال اکسیژن و پاسخ‌های التهابی شوند. بنابراین، طراحی ایمن (Safe-by-Design)، اصلاح سطحی جهت کاهش واکنش‌پذیری ناخواسته و انجام مطالعات سم‌شناسی مزمن از الزامات توسعه پایدار این دسته از نانومواد در صنعت آرایشی و بهداشتی محسوب می‌شود.



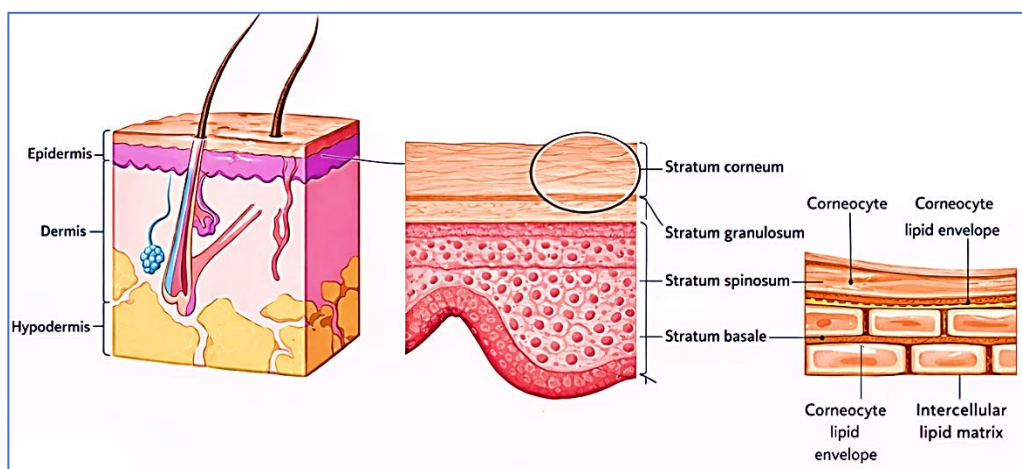
شکل ۶: معایب فناوری نانو در صنعت آرایشی و بهداشتی.

شکل ۵: مزایای فناوری نانو در صنعت آرایشی و بهداشتی.

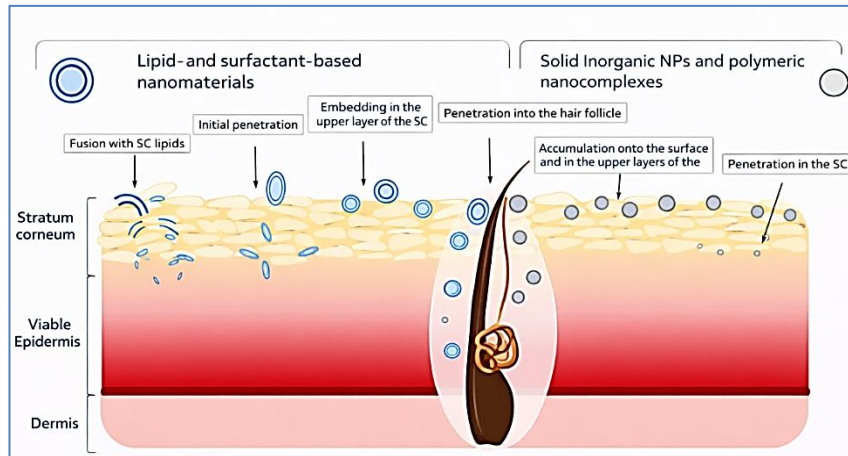
مانند محصولات دارویی ندارند؛ اما باید به این نکته توجه داشت که میزان نفوذ مواد از طریق پوست تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله محل استفاده/قرار گرفتن در معرض، رطوبت و محتوای چربی روی پوست و ماهیت شیمیایی مواد قرار دارد. دولایه لیپیدی پوست به مولکول‌های لیپید اجازه می‌دهد تا از لایه‌های لیپیدی که کورئوسیت‌ها در آن‌ها قرار دارند عبور کنند، درحالی‌که کانال‌های آبی توزیع‌شده در اطراف

فیبروبلاست‌ها و شبکه‌ای از الیاف کلاژن و الاستین در یک ماتریکس پروتئوگلیکان تشکیل شده است. وظایف اصلی درم محافظت، محافظت از ساختارهای عمیق‌تر در برابر آسیب مکانیکی، تغذیه اپیدرم و ایفای نقش مهم در بهبود زخم است.

ترکیبات آرایشی اغلب به بالاترین لایه‌های پوست محدود می‌شوند و میزان نفوذ بسیار کم است، بنابراین این ترکیبات نیازی به رعایت محدودیت‌های نظارتی



شکل ۷: عکس شماتیک از ساختار پوست.



شکل ۸: مکانیزم احتمالی از عبور نانو ذرات از پوست.

اندازه ذرات بین ۱۰۰-۲۰ نانومتر، نمی تواند به لایه های عمیق تر پوست سر نفوذ کند.

اگرچه این نانو ذرات در فضای فولیکولی یافت می شوند؛ اما در بافت های اطراف یافت نمی شوند. تأثیر نانو ذرات مبتنی بر لیپید و سورفکتانت بر روی سد پوستی به طور کامل شناخته نشده است. امولسیون ها و لیپوزوم هایی که حاوی فسفولیپید های غیر اشباع هستند، ناپایدار هستند و می توانند با اجزای پوست تعامل داشته باشند. مسیرهای احتمالی برای نفوذ بسته به ویژگی های کمپلکس های نانو پیشنهاد شده است. آنها می توانند شامل تغییراتی در ساختار لیپیدها، جذب سطحی و ادغام با SC باشند^{۳۱-۴۳}.

در صورت وجود شرایط زیر، نفوذ به پوست انجام می شود:

۱. نانومواد علاوه بر اندازه کوچک، وزن مولکولی کم دارند و نکته قابل توجه اینکه دندریمرهای نانو با اندازه ۲/۹ نانومتر اما ۳۲۵۶ دالتون به پوست سالم نفوذ نمی کنند، این در حالی است که ذرات با اندازه ۱۰ نانومتر اما با وزن کمتر در دالتون، گاهی اوقات از طریق فولیکول های مو و لایه شاخی به لایه های اپیدرمی زنده پوست می رسند.
۲. هنگامی که پوست سالم آسیب می بیند؛ بریدگی ها، سوختگی ها، بیماری های پوستی و خراش ها عملکرد سد پوست سالم را تغییر می دهند و

کورنئوسیت ها مسئول انتقال ترکیبات آبدوست هستند^{۲۷-۳۱}.

نفوذ نانومواد از طریق پوست

نفوذ نانو ذرات (شکل ۸) به پوست هنوز توسط جامعه علمی مورد بحث است؛ زیرا ممکن است اثرات سمی بر سلول های انسانی داشته باشد سه مسیر ممکن برای نفوذ نانو ذرات به پوست وجود دارد: مسیرهای درون سلولی، بین سلولی و زائده ای.

مهم ترین عامل، اندازه ذرات است. کانال های آبی با قطر سطحی ۰/۴-۳۶ نانومتر، انتقال نانومواد زیر ۳۶ نانومتر را فراهم می کنند، در حالی که احتمال عبور نانو ذرات از ماتریکس لیپیدی بین سلولی زمانی که کوچکتر از ۷-۵ نانومتر باشند، افزایش می یابد. علاوه بر این، در فضای اطراف فولیکول (۲۱۰-۱۰ میکرومتر) نانو ذراتی انباشته می شوند که می توانند در عرق و سیوم پراکنده شوند؛ نانو ذرات با بار منفی در مقایسه با نانو ذرات با بار مثبت، راحت تر از پوست عبور می کنند. نانو ذرات معدنی جامد و نانومواد پلیمری روی سطح پوست تجمع می یابند و در لایه های بالایی پوست سر شناسایی می شوند. به عنوان مثال، کرم های ضد آفتاب حاوی ZnO از پوست طبیعی عبور نمی کنند بنابراین، روی به دلیل انحلال نانو ذرات در درم تجمع می یابد. یکی دیگر از ترکیبات مورد استفاده در کرم های ضد آفتاب معدنی، TiO_2 است که به دلیل

در غلظت ۲-۰/۲ درصد هم نفوذ می‌کنند که خوشبختانه در این سطح، نانوذرات هیچ سمیتی نشان نمی‌دهند؛ اما اندازه‌های کوچک‌تر نانوذرات، نفوذ بهتری به پوست ایجاد می‌کنند. مثلاً نانوذرات با قطر کمتر از ۱۰ نانومتر می‌توانند به لایه عمیق‌تر لایه شاخی برسند؛ اما اندازه‌های بزرگتر از ۴۰ نانومتر فقط می‌توانند به ۵-۸ میکرومتر در لایه شاخی برسند؛ اما باید توجه داشت که استنشاق و بلعیدن هم به‌طور یکسان می‌توانند در ورود نانوذرات به جریان خون نقش داشته باشند.

مسیرهای دیگر ورود نانو مواد به بدن انسان

گسترش تولید و کاربرد صنعتی نانومواد، علاوه بر ایجاد فرصت‌های نوآورانه در حوزه‌های مختلف از جمله صنایع آرایشی و بهداشتی، نگرانی‌هایی را درخصوص مسیرهای مواجهه و پیامدهای زیستی احتمالی آن‌ها مطرح کرده است. با افزایش حجم تولید و مصرف محصولات حاوی نانومواد، جمعیت بیشتری از کارگران خطوط تولید، توزیع‌کنندگان و مصرف‌کنندگان نهایی در معرض این ذرات قرار می‌گیرند. اگرچه تماس پوستی یکی از مهم‌ترین مسیرهای مواجهه در محصولات آرایشی محسوب می‌شود؛ اما مسیرهای غیرپوستی نظیر استنشاق و بلع نیز می‌توانند نقش قابل‌توجهی در ورود نانوذرات به بدن ایفا کنند. استنشاق، شایع‌ترین مسیر مواجهه شغلی و محیطی با نانوذرات معلق در هوا به‌شمار می‌رود. در محیط‌های صنعتی، ذرات نانومقیاس ممکن است طی فرآیندهای تولید، بسته‌بندی یا انتقال در هوا منتشر شده و توسط کارگران استنشاق شوند. همچنین در مصرف‌کنندگان، استفاده از فرآورده‌های آرایشی آئروسول‌شونده نظیر اسپری‌های مو، دئودورانت‌ها، پودرهای فشرده و برخی ضدآفتاب‌های پودری می‌تواند منجر به ورود ذرات معلق به دستگاه تنفسی گردد. پس از استنشاق، الگوی رسوب نانوذرات در مجاری تنفسی به عواملی نظیر اندازه آیرودینامیک، بار سطحی، شکل، میزان

درنتیجه در را برای ورود ذرات، به‌ویژه نانوذرات موجود در محصولات آرایشی به پوست باز می‌کنند. ۳. استفاده از مواد افزایش‌دهنده نفوذ یا خم‌شدن پوست؛ آب، الکل، دی‌متیل سولفوکسید و برخی سورفکتانت‌های دیگر برای دستیابی به نفوذ پوستی به‌کار گرفته شده‌اند، به‌عنوان افزایش‌دهنده‌های نفوذ اجزای لوازم آرایشی هستند که با نام تقویت‌کننده‌های نفوذ هم شناخته می‌شوند. حضور این مواد احتمال جذب نانوذرات موجود در لوازم آرایشی به پوست هنگام استفاده را افزایش می‌دهد علاوه‌براین برخی از عوامل شیمیایی پس از استفاده، قابلیت تخریب برگشت‌پذیر پوست سالم و کم‌نفوذ را دارند که خم‌کردن مکانیکی پوست هم جزئی از این دسته است این عوامل هم می‌توانند جذب پوستی مواد آرایشی فعال را افزایش می‌دهند.

۴. شیوع مسیرهای زائده؛ یکی از راه‌های دوزدن سد پوست سالم، نفوذ از طریق مسیر زائده است. مسیرهای فولیکولی از طریق فولیکول مو با غده چربی مرتبط با آن و حتی منافذ عرق می‌توانند وسیله‌ای برای نفوذ لیپیدها، نیوزوم‌ها یا نانوذرات در اندازه نانو به فراتر از سطح پوست به لایه‌های زنده باشند؛ اما نکته قابل توجه اینکه در این حالت ممکن است مقدار جذب حداقل خواهد باشد؛ زیرا زائده‌ها فقط ناحیه کوچکی از پوست را اشغال می‌کنند و برخی از آن‌ها از قبل توسط سبوم یا عرق پر شده‌اند که به ترتیب در جهت مخالف ماده آرایشی که برای رساندن به پوست استفاده می‌شود، جریان می‌یابند.

از موارد فوق می‌توان استنباط کرد که ایمنی نانومواد آرایشی پس از مواجهه پوستی به وضعیت پوست بستگی دارد؛ علاوه‌براین، سد پوستی به اندازه کافی قوی است که از نفوذ نانوذرات به آن جلوگیری کند؛ اما در مواجهه با پوست آسیب‌دیده نانوذرات نقره

تجمع‌پذیری و ویژگی‌های شیمی سطح آن‌ها وابسته است. ذرات بسیار ریز قادرند به نواحی عمقی ریه از جمله آلوئول‌ها نفوذ کرده و از طریق سد آلوئولی - مویرگی وارد گردش خون سیستمیک شوند. افزون بر این، شواهد تجربی نشان داده‌اند که برخی نانوذرات می‌توانند از طریق مسیر بویایی و اعصاب اولفکتوری از حفره بینی به سیستم عصبی مرکزی منتقل شوند و بدین ترتیب بدون عبور از سد خونی - مغزی کلاسیک، به بافت مغز دسترسی پیدا کنند؛ موضوعی که از منظر نورو توكسیسیته بالقوه، نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر است. مسیر دیگر ورود نانومواد، بلع غیرمستقیم است. استفاده از محصولات آرایشی در ناحیه لب و دهان (مانند رژلب، بالم لب یا خمیردندان‌های حاوی نانوذرات) می‌تواند به بلع مقادیر اندکی از این ذرات منجر شود. همچنین پاک‌شدن محصولات پوستی و ورود آن‌ها به آب آشامیدنی یا مواد غذایی از طریق آلودگی محیطی، احتمال مواجهه خوراکی غیرمستقیم را افزایش می‌دهد. پس از ورود به دستگاه گوارش، پایداری نانوذرات در pH متغیر معده و روده، برهم‌کنش آن‌ها با پروتئین‌ها و تشکیل «پوشش پروتئینی (Protein Corona)»، تعیین‌کننده میزان جذب و توزیع سیستمیک آن‌ها خواهد بود. به دلیل ابعاد بسیار کوچک و سطح ویژه بالای نانوذرات، این ساختارها در صورت عبور از سدهای بیولوژیک قادرند وارد جریان خون شده و به اندام‌های مختلف از جمله کبد، کلیه، طحال، مغز و حتی جفت منتقل شوند. توزیع زیستی (Biodistribution)، ماندگاری بافتی و مسیرهای دفع این ذرات به عواملی همچون اندازه، شکل، ترکیب شیمیایی، بار سطحی و زیست تخریب‌پذیری آن‌ها وابسته است. از این رو، ارزیابی جامع مسیرهای مواجهه، دوز واقعی جذب‌شده و پیامدهای کوتاه‌مدت و بلندمدت آن، برای تدوین چارچوب‌های ایمنی و مقررات نظارتی در حوزه محصولات آرایشی و بهداشتی مبتنی بر فناوری نانو

ضروری به نظر می‌رسد.^{۴۴}

خوردن آن دسته از مواد آرایشی و بهداشتی که در نزدیکی دهان یا لب‌ها استفاده می‌شوند، ممکن است باعث انتقال غیرعمدی نانوذرات به دهان شود.

نگرانی‌های مربوط به ایمنی و سلامت فناوری نانو در صنعت آرایشی و بهداشتی

نانومواد در صنعت آرایشی به کار برده می‌شوند؛ زیرا می‌توانند به عنوان مواد فعال عمل کنند، رئولوژی را تغییر دهند و اجزای زیست فعال را حمل کنند. خواص منحصربه‌فرد نانوذرات مورد استفاده در لوازم آرایشی از یک سو مزایای جذابی را با اثر زیبایی ارائه می‌دهد؛ اما از سوی دیگر، می‌تواند اثرات نامطلوب بالقوه‌ای بر سیستم بدن داشته باشد. این امر نگرانی‌های ایمنی و خطرات سلامتی را افزایش می‌دهد، به خصوص به این دلیل که خواص ذرات به سرعت در هنگام کاهش به اندازه نانو تغییر می‌کنند.

همانطور که قبلاً اشاره شد، سمیت نانومواد هنوز به طور کامل درک نشده است؛ اما بررسی میزان آسیب یا ضرر در بدن، سمیت را نشان می‌دهد. سمیت مشاهده‌شده در نانوذرات فقط تابعی از اندازه ذرات نیست، بلکه احتمالاً ماهیت نانوذرات هم مؤثر که نانوذرات نامحلول معمولاً مقصر هستند. نانوذرات نقره معمولاً به دلیل اثر ضد میکروبی خود در لوازم آرایشی استفاده می‌شوند. با این حال، توجه به این نکته ضروری است که غلظتی از نانونقره که خاصیت باکتری‌کشی دارد، می‌تواند برای سلول‌های بدن مانند کراتینوسیت‌ها و فیبروبلاست‌ها نیز کشنده باشد.

عمدتاً نگرانی‌های ایمنی مرتبط با ذرات نانو در محصولات آرایشی در مورد این است که آیا آن‌ها می‌توانند در طول تولید یا از طریق استفاده وارد جریان خون شوند. نیاز به ایمنی نانومواد در ایالات متحده زمانی مطرح شد که گروه ویژه فناوری نانو اداره غذا و دارو (FDA) توصیه‌هایی را برای بررسی نظارتی با تأکید ویژه بر ایمنی و عدم تقلب محصولات آرایشی

احتمالی مورد تحلیل قرار می‌گیرند. علاوه‌براین، استفاده از مدل‌های پوست سه‌بعدی بازسازی‌شده انسانی، سامانه‌های میکروفلوئیدیک پوست روی تراشه انسانی، روش‌های سم‌شناسی محاسباتی (Skin-On-A chip)، و فناوری‌های آمیکس (In Silico Toxicology) و فناوری‌های دقیق‌تر (Omics Technologies) امکان ارزیابی دقیق‌تر پاسخ‌های سلولی، استرس اکسیداتیو، التهاب و تغییرات بیان ژن را فراهم ساخته است.

چنین رویکردی نه تنها به کاهش عدم قطعیت‌های موجود در زمینه ایمنی نانومواد کمک می‌کند، بلکه زمینه‌ساز توسعه مفهوم «ایمن‌سازی در مرحله طراحی» (Safe-by-Design) نیز می‌گردد؛ مفهومی که بر اصلاح ویژگی‌های ساختاری نانوذرات از مراحل اولیه توسعه محصول به منظور حداقل‌سازی خطرات بالقوه تأکید دارد. در این راستا، تلفیق داده‌های سم‌شناسی پیش‌بالینی، پایش پس از ورود به بازار و شفافیت در برچسب‌گذاری، می‌تواند چارچوبی جامع برای تضمین سلامت مصرف‌کننده فراهم آورد بنابراین، آینده کاربرد نانومواد در صنعت آرایشی نه تنها به نوآوری فناورانه، بلکه به استقرار نظام‌های ارزیابی ریسک چندسطحی و مبتنی بر شواهد وابسته است تا توازن پایدار میان کارایی، زیبایی و ایمنی برقرار گردد.

مخاطرات زیست محیطی فرمولاسیون‌های مبتنی بر فناوری نانو

پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که استفاده از انواع مختلفی از نانوذرات، علاوه‌بر اینکه می‌تواند برای بافت‌های بدن انسان مضر باشند و منجر به افزایش استرس، جهش DNA و حتی مرگ در انسان شود. از طرف دیگر این نانو ذرات می‌تواند تأثیرات منفی بر موجودات دیگر همچون میکروارگانیسم‌ها، گیاهان و حیوانات نیز داشته باشند. به‌عنوان مثال نانو ذره آلومینیوم موجود در ضدآفتاب‌ها موجب کندی رشد ریشه گیاهان شده یا نانوذره کربن استفاده‌شده در کرم‌ها و مرطوب‌کننده‌ها باکتری‌های مفید موجود در

ارائه داد. برای ارزیابی ایمنی نانوذرات در لوازم آرایشی توسط FDA، دو بخش اصلی اطلاعات (استراتژی) ضروری است؛ یکی اطلاعات در مورد مشخصات ماده، به ویژه شکل نانوی مورد استفاده آن است. از آنجا که نانوذرات می‌توانند خواص فیزیکوشیمیایی را تغییر دهند، اطلاعات مربوط به چنین موادی و همچنین محصولات آرایشی نهایی شامل چنین خواصی، تعاملات بیولوژیکی آن‌ها و توصیف هرگونه ناخالصی مرتبط خواهد بود. چنین اطلاعات دقیق و در دسترس می‌تواند به کارشناسان ایمنی سلامت کمک کند تا موارد مسمومیت، آلودگی یا آلرژی را به‌درستی مدیریت کنند. دومین مورد از این اطلاعات، داده‌های سم‌شناسی محصول در اندازه نانو است. این اطلاعات از ارزیابی مواد تشکیل‌دهنده لوازم آرایشی برای سمیت سیستمیک حاد، مزمن، نیمه مزمن، سوزش و آلرژی پوستی، سوزش ناشی از نور و آلرژی به نور، پتانسیل سم‌شناسی مواجهه تجمعی با محصولات مشابه یا استفاده مکرر از برخی محصولات، قابل دستیابی است. سایر داده‌های لازم شامل سمیت ژنتیکی، سمیت جنینی، ارزیابی سرطان‌زایی و همچنین آسیب به سلامت باروری خواهد بود.^۲

علاوه‌بر موارد فوق، رویکردهای نوین ارزیابی ایمنی نانومواد در صنعت آرایشی و بهداشتی به سمت گذار از آزمون‌های سنتی به مدل‌های پیشرفته پیش‌بینی‌کننده حرکت کرده‌اند؛ به گونه‌ای که امروزه تأکید بر شناسایی روابط ساختار - فعالیت (Structure-Activity Relationships) و به‌کارگیری چارچوب‌های ارزیابی ریسک مبتنی بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی (Nano-specific Risk Assessment) به‌عنوان راهبردی علمی و آینده‌نگر مطرح است.

در این چارچوب، پارامترهایی نظیر اندازه هیدرودینامیک، پتانسیل زتا، درجه تبلور، قابلیت انحلال، پوشش سطحی و تمایل به تشکیل آگلومره، به‌طور همزمان در پیش‌بینی رفتار زیستی و سمیت

آب را از بین می‌برند. مطالعات نشان داده‌اند که برخی نانومواد به دلیل سطح ویژه بالا و واکنش‌پذیری قابل توجه، می‌توانند سمیت بیشتری نسبت به مواد در مقیاس توده‌ای از خود نشان دهند و از طریق القای استرس اکسیداتیو، پاسخ‌های التهابی و آسیب سلولی، منجر به اختلال در عملکرد سلول‌ها و حتی مرگ سلولی در مدل‌های آزمایشگاهی و حیوانی شوند. افزون بر این، پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از رهاسازی نانوذرات در اکوسیستم‌ها نیز موضوعی قابل تأمل است. با توجه به گسترش روزافزون کاربرد نانومواد در محصولات آرایشی و بهداشتی، ارزیابی دقیق ریسک، پایش مستمر و تحلیل هزینه - فایده اجتماعی و سلامت محور این فناوری ضروری به نظر می‌رسد؛ به گونه‌ای که تصمیم‌گیری درباره محدودسازی یا اصلاح کاربرد آنها باید مبتنی بر شواهد علمی جامع و مطالعات تکمیلی بلندمدت باشد.

نظارت‌ها و استانداردها بر استفاده از فناوری نانو در صنعت آرایشی و بهداشتی

اخذ مجوزهای سخت‌گیرانه برای محصولات درمانی قبل از ورود به بازار و عرضه برای مصرف عمومی لازم و ضروری است؛ اما متأسفانه این اصل در مورد محصولات آرایشی اعمال و رعایت نمی‌شود. درست است که داروها با لوازم آرایشی متفاوت هستند؛ اما همانطور که گفته شد، بسیاری از لوازم آرایشی موجود در بازار امروز فعالیت‌های بیولوژیکی دارند و با تقویت‌کننده‌های نفوذ می‌توانند نفوذ به پوست را افزایش دهند که این امر می‌تواند اثر سیستمیک ایجاد کند. بدون شک، با توجه به شواهد و خطرات جدی سمیت نانو، نانوذرات باید به عنوان مواد شیمیایی جدیدی در نظر گرفته شوند که نیاز به ارزیابی‌های ایمنی جدید قبل از اجازه استفاده در هر محصول مصرفی دارند. این امر به این معنی است که هر ماده نانومقیاس که در محصولات مصرفی آرایشی و بهداشتی استفاده می‌شوند، باید استانداردهای لازم را

اخذ کند تا مصرف‌کنندگان بتوانند با خیالی آسوده از این محصولات استفاده کنند بنابراین، تولیدکنندگان و بازاریابان محصولات آرایشی و بهداشتی باید مواد نانومقیاس مورد تأیید را در محصولات خود مورد استفاده قرار دهند چون طبق قانون مسئول تضمین ایمنی و برچسب‌گذاری مناسب محصول و همچنین هرگونه خطری هستند که مستقیماً با خواص تغییر یافته نانومواد در مقایسه با همتای میکروسکوپی یا مولکولی بزرگتر آنها رخ داده است.

کمیسیون اروپا (EC) در آیین‌نامه شماره (EC 1223/2009) مقرر کرده است که تولیدات در صنعت محصولات آرایشی و بهداشتی است، باید ابتدا در پورتال اطلاع‌رسانی محصولات آرایشی و بهداشتی (CPNP) ثبت شده و سپس جزئیات محصول مانند ترکیب، نانومواد بودن، شناسایی و هرگونه خطرات احتمالی را ارائه دهند. این اطلاعیه باید شش ماه قبل از ورود محصول به بازار در دسترس قرار گیرد تا زمان کافی برای کمیته علمی ایمنی مصرف‌کننده (SCCS) فراهم شود تا قبل از تأیید ورود به بازار، ارزیابی ریسک محصول را برای هرگونه نگرانی ناشی از استفاده از این محصولات انجام دهند.

هرگونه لوازم آرایشی و بهداشتی حاوی نانومواد باید پس از نظر کمیسیون اروپا، که داده‌های سم‌شناسی ارائه‌شده را قبل از استفاده بررسی می‌کند، توسط کمیسیون اروپا تأیید شود. همچنین نانومواد استفاده‌شده در محصولات باید در فهرست مواد تشکیل‌دهنده با کلمه «نانو» در روی برچسب‌گذاری مشخص شوند. برای تجزیه و تحلیل صحیح سمیت نانو مواد استفاده‌شده در لوازم آرایشی و بهداشتی، همکاری بین‌المللی در مورد مقررات لوازم آرایشی (ICCR) توصیه‌هایی را برای استفاده از روش‌های آزمایش حیوانی در ارزیابی ایمنی لوازم آرایشی و بهداشتی ارائه کرده و تصریح کرده است که در ارزیابی ریسک هرگونه لوازم آرایشی و بهداشتی، باید با ارزیابی مناسب هرگونه

ذره، توزیع اندازه، ویژگی های سطحی و رفتار تجمعی در ماتریس های پیچیده آرایشی - می تواند از بروز ناهمگونی در ارزیابی های ریسک جلوگیری کند. ادغام فناوری های نوین مانند سم شناسی پیش بینانه، مدل های مبتنی بر هوش مصنوعی برای تحلیل داده های ایمنی، و پایش عوارض ناخواسته پس از عرضه (cosmetovigilance) نیز به تصمیم گیری مبتنی بر شواهد کمک خواهد کرد. افزون بر این، شفافیت در برچسب گذاری، آموزش مصرف کنندگان و گزارش دهی عمومی نتایج ارزیابی های ایمنی، نقش مهمی در ارتقای اعتماد عمومی ایفا می کند. بدین ترتیب، همگرایی میان صنعت، نهادهای قانون گذار، جامعه علمی و سازمان های بین المللی می تواند به ایجاد یک چارچوب نظارتی تطبیق پذیر، پاسخگو و آینده نگر منجر شود که ضمن حمایت از نوآوری، بالاترین سطح ایمنی و سلامت مصرف کنندگان را تضمین نماید^{۴۶-۴۹}.

در یک جمع بندی راهبردی می توان بیان داشت که فناوری نانو نه تنها یک ابزار ارتقای عملکرد در صنعت آرایشی و بهداشتی، بلکه یک پارادایم تحول آفرین در طراحی، فرمولاسیون و مهندسی سامانه های مراقبت پوستی محسوب می شود؛ چراکه مهندسی مواد در مقیاس نانومتری با افزایش سطح ویژه، اصلاح ویژگی های بین سطحی و امکان کنترل دقیق بر سینتیک رهایش، ظرفیت بی سابقه ای برای بهبود نفوذ پوستی، افزایش زیست فراهمی، پایداری ترکیبات حساس، کاهش دوز مصرفی و ارتقای شاخص های حسی و کیفی محصولات فراهم آورده است. بهره گیری از نانوحامل هایی نظیر لیپوزوم ها، نانوامولسیون ها، نانوکپسول ها، نانوذرات لیپیدی، ساختارهای فلزی و سامانه های کربنی، نشان دهنده گذار صنعت از فرمولاسیون های سنتی به سامانه های هوشمند و هدفمند است که می توانند پاسخ های زیستی دقیق تر و ماندگارتری ایجاد کنند. با این حال، همان ویژگی هایی

اطلاعات موجود در مورد محصولات آغاز شود، در حالی که هرگونه منبع تشکیل دهنده مشخص و مستند خواهد شد. نظارت پس از ورود به بازار نیز به همان اندازه ضروری است. هنگامی که یک محصول در بازار است، داده های علمی همچنان جمع آوری می شوند.

روش های جدید ایمنی نیز به عنوان تکامل دانش علمی جدید در نظر گرفته می شوند. با پیشرفت علم و تغییر ترجیحات مصرف کنندگان، صنعت به طور مداوم نوآوری شده تا اطمینان حاصل کند که میلیون ها خانواده ایمن ترین، با کیفیت ترین و در عین حال قابل قبول ترین محصولات را دارند که به غنی سازی زندگی آن ها کمک می کند. از آنجایی که نهادهای نظارتی کشورهای مختلف، نانومواد موجود در لوازم آرایشی را برای عرضه در بازارهای محل خود نظارت و استاندارد می کنند، به اشتراک گذاشتن اطلاعات موجود و چالش های احتمالی برای دستیابی به آن ها، در صورت وجود، به پرکردن شکاف برای یک تلاش جهانی هماهنگ و متعهدانه در تضمین ایمنی در استفاده از محصولات آرایشی نیز کمک خواهد کرد^{۴۵}.

در تکمیل چارچوب های نظارتی موجود، به نظر می رسد آینده حکمرانی بر نانومواد در صنعت آرایشی و بهداشتی مستلزم گذار از رویکردهای ایستای پیش مجوزی به نظام های «نظارت چرخه عمر محور (Life-Cycle Governance)» و ارزیابی ریسک پویا باشد؛ رویکردی که تمامی مراحل از طراحی فرمولاسیون، تولید، بسته بندی و مصرف تا دفع و ورود به محیط زیست را دربرگیرد. در این مدل، تولیدکنندگان ملزم به استقرار سامانه های ردیابی (traceability)، بانک های داده اختصاصی نانومواد و به روزرسانی مستمر پرونده ایمنی محصول براساس شواهد نوظهور خواهند بود. همچنین توسعه دستورالعمل های هماهنگ بین المللی برای استانداردسازی روش های شناسایی، اندازه گیری و توصیف ویژگی های نانومقیاس - از جمله تعیین اندازه

بهداشتی نه در حذف یا پذیرش مطلق آن، بلکه در ایجاد توازن هوشمندانه میان نوآوری فناورانه، مسئولیت‌پذیری صنعتی، حکمرانی علمی و صیانت از سلامت انسان و محیط زیست رقم خواهد خورد؛ توازنی که می‌تواند این فناوری را از یک مزیت رقابتی کوتاه‌مدت به یک زیرساخت پایدار و اعتمادآفرین در اکوسیستم جهانی زیبایی و مراقبت شخصی تبدیل کند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از تمامی اساتید و پژوهشگران حوزه پوست، نانوفناوری و صنایع آرایشی و بهداشتی که با ارائه دیدگاه‌های علمی و راهنمایی‌های ارزشمند خود در تدوین این مقاله نقش مؤثری داشته‌اند، صمیمانه قدردانی نمایند. همچنین از مسئولان و کارشناسان مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی که با فراهم‌نمودن منابع علمی و تسهیل دسترسی به داده‌های پژوهشی، زمینه انجام این مطالعه را مهیا ساختند، سپاس‌گزاری می‌شود.

که مزیت عملکردی ایجاد می‌کنند - ازجمله ابعاد بسیار کوچک، واکنش‌پذیری سطحی بالا و قابلیت عبور از موانع بیولوژیک - می‌توانند منشأ نگرانی‌های بالقوه‌ای در زمینه استرس اکسیداتیو، پاسخ‌های التهابی، تجمع زیستی، مواجهه‌های استنشاقی یا خوراکی و اثرات اکوتوکسیک باشند؛ موضوعی که نشان می‌دهد ارزیابی ایمنی نانومواد نیازمند رویکردی چندسطحی، چرخه‌عمرمحور و مبتنی بر شواهد است و نمی‌توان آن‌را با معیارهای مواد در مقیاس ماکرو قیاس کرد از این‌رو، توسعه پایدار این حوزه مستلزم استقرار نظام‌های نظارتی پویا، استانداردسازی روش‌های شناسایی و توصیف نانومواد، به‌کارگیری مدل‌های پیش‌بینانه سم‌شناسی (*in vitro* و *in silico* پیشرفته) پیاده‌سازی اصل «ایمن‌سازی در مرحله طراحی» (Safe-by-Design)، تقویت نظام‌های پایش پس از عرضه (*cosmetovigilance*) و ارتقای شفافیت در برچسب‌گذاری و اطلاع‌رسانی به مصرف‌کنندگان است. درنهایت، آینده فناوری نانو در صنعت آرایشی و

References

1. Nikam R, Sharma Y. A review on nanotechnology in cosmetics. *Res Rev J Pharm Nanotechnol* 2025;13: 1-8.
2. Effiong D, Uwah TO, Jumbo EU, et al. Nanotechnology in cosmetics: Basics, current trends and safety concerns—A review. *Adv Nanopart* 2020;9:1-22.
3. Foteva T. Nanotechnology in the cosmetic industry: Review. *J Chem Technol Metall* 2024;59:3-14.
4. Piluk T, Faccio G, Letsiou S, et al. A critical review investigating the use of nanoparticles in cosmetic skin products. *Environ Sci Nano* 2024;11:3674-92.
5. Hajare M, Dudani R, Kharwade R. Contribution of nanocarriers in effective development of cosmeceuticals. *Int J Pharm Sci Rev Res* 2021;72:53-62.
6. Personal Care Products Council. Dior Capture Dreamskin Moist & Perfect Cushion SPF 50 PA+++. INCIdecoder cosmetic ingredient database. 2023. Available from: <https://incidecoder.com/products/dior-capture-dreamskin-moist-perfect-cushion-spf-50-pa>.
7. Hajare M, Dudani R, Kharwade R. Emerging trends of nanotechnology in advanced cosmetics. *Colloids Surf B Biointerfaces* 2022;214:112440.
8. Santos AC, Morais F, Simões A, et al. Nanotechnology for the development of new cosmetic formulations. *Expert Opin Drug Deliv* 2019;16:313-30.
9. Effiong DE, Uwah TO, Jumbo EU, et al. Nanotechnology in cosmetics: Basics, current trends and safety concerns—A review. *Adv Nanopart* 2019;9:1-22.

10. Sonnevile-Aubrun O, Yukuyama MN, Pizzino A. Application of nanoemulsions in cosmetics. In: Nanotechnology for the preparation of cosmetics using plant-based extracts. Elsevier 2018. : 435–75.
11. Kaul S, Gulati N, Verma D, et al. Role of nanotechnology in cosmeceuticals: A review of recent advances. J Pharm 2018; 1; 3420204.
12. Mousavi S, Maibach HI. Nanotechnology in cosmetics: Theoretical principles and applications. Elsevier 2017: 337–61.
13. Abbasi BH, Fazal H, Ahmad N, Ali et al. Nanomaterials-induced advancement in cosmetics, challenges, and opportunities. Elsevier 2020: 79–108.
14. Yadwade R, Gharpure S, Ankamwar B. Nanotechnology in cosmetics: Pros and cons. Nano Express 2021;2:022003.
15. Zielinska A, Nowak I. Nanobiomaterials in galenic formulations and cosmetics: Applications of nanobiomaterials. Elsevier 2016: 231–55.
16. Patel V, Sharma OP, Mehta T. Nanocrystal: A novel approach to overcome skin barriers for improved topical drug delivery. Expert Opin Drug Deliv 2018;15:351–368.
17. Santos AC, Morais F, Simões A, et al. Nanotechnology for the development of new cosmetic formulations. Expert Opin Drug Deliv 2019;16:313–30.
18. Ha T, Jeong J, Jung B, et al. Cosmetic pigment composition containing gold or silver nanoparticles. European patent EP1909745A1 2008.
19. Gajbhiye S, Sakharwade S. Silver nanoparticles in cosmetics. J Cosmetics Dermatol Sci Appl 2016;6:48–53.
20. Morones JR, Elechiguerra LJ, Camacho A, et al. The bactericidal effect of silver nanoparticles. Nanotechnol 2005;16:2346–53.
21. Singh S, Pandey SK, Vishwakarma N. Functional nanomaterials for the cosmetics industry. In: Handbook of functionalized nanomaterials for industrial applications. Elsevier 2020: 717–30.
22. Mohammed Y, Holmes A, Haridass A, et al. Support for the safe use of zinc oxide nanoparticle sunscreens: Lack of skin penetration or cellular toxicity after repeated application in volunteers. J Invest Dermatol 2019;139:308–15.
23. Dreno B, Alexis A, Chuberre B, et al. Safety of titanium dioxide nanoparticles in cosmetics. J Eur Acad Dermatol Venereol 2019;33:34–46.
24. Pandey P, Satija S, Wadhwa R, et al. Emerging trends in nanomedicine for topical delivery in skin disorders: Current and translational approaches. Dermatol Ther 2020;33:e13292.
25. Raj S, Jose S, Sumod US, et al. Nanotechnology in cosmetics: Opportunities and challenges. J Pharm Bioallied Sci 2012;4:186–93.
26. Katz LM, Dewan K, Bronaugh RL. Nanotechnology in cosmetics. Food Chem Toxicol 2015;85:127–37.
27. Nikam R, Sharma Y. A review on nanotechnology in cosmetics. Res Rev J Pharm Nanotechnol 2025;13:1–8.
28. Bos JD, Meinardi MMHM. The 500 Dalton rule for the skin penetration of chemical compounds and drugs. Exp Dermatol 2000;9:165–169.
29. Salvioni L, Morelli L, Ochoa E, et al. The emerging role of nanotechnology in skincare. Adv Colloid Interface Sci 2021;293:102437.
30. Hatta I, Sakamoto K, Lochhead RY, et al. Cosmetic science and technology: Theoretical principles and applications. Elsevier 2017: 699–709.

31. Baroli B. Penetration of nanoparticles and nanomaterials in the skin: Fiction or reality? *J Pharm Sci* 2010;99:21–50.
32. Liang X, Xu Z, Grice J, et al. Penetration of nanoparticles into human skin. *Curr Pharm Des* 2013;19:6353–66.
33. Shegokar R, Souto EB. Emerging nanotechnologies in immunology: Design, applications and toxicology of nanopharmaceuticals and nanovaccines. Elsevier 2018:47–88.
34. Ghasemiyeh P, Mohammadi-Samani S. Potential of nanoparticles as permeation enhancers and targeted delivery options for skin: advantages and disadvantages. *Drug Des Devel Ther* 2020;14:3271–93.
35. Baroli B, Ennas MG, Loffredo F, et al. Penetration of metallic nanoparticles in human full-thickness skin. *J Invest Dermatol* 2007;127:1701–12.
36. Palmer BC, DeLouise LA. Nanoparticle-enabled transdermal drug delivery systems for enhanced dose control and tissue targeting. *Molecules* 2016;2:1719.
37. Mahmoud NN, Alkilany AM, Dietrich D, et al. Preferential accumulation of gold nanorods into human skin hair follicles: Effect of nanoparticle surface chemistry. *J Colloid Interface Sci* 2017;503:95–102.
38. Lee O, Jeong SH, Shin WU, et al. Influence of surface charge of gold nanorods on skin penetration. *Skin Res Technol* 2013;19:e390–96.
39. Nohynek GJ, Dufour EK. Nano-sized cosmetic formulations or solid nanoparticles in sunscreens: A risk to human health? *Arch Toxicol* 2012;86:1063–75.
40. Lekki J, Stachura Z, Dabroś W, et al. On the follicular pathway of percutaneous uptake of nanoparticles: Ion microscopy and autoradiography studies. *Nucl Instrum Methods Phys Res B* 2007;260:174–77.
41. Roberts MS, Mohammed Y, Pastore MN, et al. Topical and cutaneous delivery using nanosystems. *J Control Release* 2017;247:86–105.
42. Cornier J, Keck CM, Van de Voorde M. *Nanocosmetics*. Springer 2019: 95–140.
43. Desmet E, Van Gele M, Lambert J. Topically applied lipid- and surfactant-based nanoparticles in the treatment of skin disorders. *Expert Opin Drug Deliv* 2017;14:109–22.
44. Ong W, Nyam K. Evaluation of silver nanoparticles in cosmeceuticals and potential biosafety complications. *Saudi J Biol Sci* 2022;29:2085–94.
45. Amaral R, da Silva PA, Ansell J, et al. Strategies for safety assessments of cosmetic ingredients. report for the international cooperation on cosmetics regulation (iccr) joint regulator–industry working group. 2017;1–16.
46. Yazdani M, Elgstøen KBP, Utheim TP. Eye make-up products and dry eye disease: A mini review. *Curr Eye Res* 2022; 47: 1-11
47. Nowruzi B. A review of sunscreens and moisturizers compounds driven from cyanobacteria. *J Dermatol Cosmet* 2022; 13:119-32
48. Hatami B, Davari F, Mohammad Alizadeh AH, et al. Investigation of medical complaints related to ERCP processed in the general directorate of forensic medicine of Tehran province during a six-year period (2011-2016). *Iran J Forens Med* 2018; 25: 77-80.
49. H Asgari Rad, M Saeedi, Azad Bakht. Heavy metals (cadmium, zinc, nickel, chrome, lead, and copper) contamination in kohl available in iran's market. *J Maz Univ Med Sci* 2016; 25:295-304.

Advantages, challenges, and safety considerations of nanotechnology applications in the cosmetic industry: a narrative review

Zahra Khayyat Sarkar, MSc¹
Behrouz Akbari Adergani, PhD*²
Farnaz Nasri, PhD¹
Mahmoud Aleboyeh, PhD¹

1. Food and Drug Research Center, Food and Drug Administration, Ministry of Health and Medical Education, Tehran, Iran
2. Water Safety Research Center, Food and Drug Administration, Ministry of Health and Medical Education, Tehran, Iran

Received: Dec 08, 2025
Accepted: Feb 09, 2026
Pages: 247-267

Corresponding Author:
Behrouz Akbari Adergani, PhD

Fakhr-e Razi St., Enghelab St., Tehran, Iran
Email: b.akbari@fda.gov.ir

Conflict of interest: None to declare

Over the past two decades, nanotechnology has played a pivotal role in transforming the cosmetic and personal care industry, establishing itself as one of the most revolutionary achievements in materials science. The reduction of particle size to the nanometer scale, by increasing the specific surface area and enhancing physicochemical properties, has enabled improved skin penetration, increased stability of active compounds, and facilitated the targeted release of active ingredients, leading to the production of products with higher efficacy. However, concurrent with the expansion of this technology, concerns regarding the biosafety, potential toxicity, and environmental consequences of nanoparticles have been raised, highlighting the necessity for rigorous evaluation. Therefore, this article aims to provide a comprehensive analysis of the advantages, limitations, and safety considerations associated with the application of nanotechnology in the cosmetic and personal care industry. In this analytical review, articles and sources published in reputable scientific databases between 2015 and 2025 were evaluated and analyzed. The results indicated that the utilization of nanostructures such as nanoliposomes, nanoemulsions, metallic nanoparticles, and lipid nanoparticles in the formulation of cosmetic products, while optimizing performance and increasing bioavailability, has created significant potential for innovation in this industry. Conversely, evidence has been reported regarding the induction of oxidative stress, inflammatory responses, and regulatory challenges in the context of long-term risk assessment. The application of nanotechnology in the cosmetic and personal care industry holds substantial innovative capacity and high added value; nevertheless, ensuring consumer safety necessitates long-term toxicological studies and the development of clear regulatory frameworks. Establishing a balance between industrial innovation and public health considerations is a fundamental condition for the sustainable development of this technology.

Keywords: nanotechnology, nanoparticles, cosmetic and personal care industry, toxicity, regulatory framework

