بسمه
تعالی

دل هر ذره را که بشکافی
آفتابیش در میان بینی

هاتف اصفهانی

دانش و فناوری ۱۲

نانوفناوری پزشکی

روش‌ها و کاربردها

مؤلفین:

دکتر مهدی آدابی
عضو هیئت علمی دانشگاه علوم پزشکی تهران

دکتر سمیه ابراهیمی باروق
عضو هیئت علمی دانشگاه علوم پزشکی تهران

دکتر سید محمدامینی
عضو هیئت علمی دانشگاه علوم پزشکی ایران

دکتر اسماعیل میرزایی
عضو هیئت علمی دانشگاه علوم پزشکی شیراز

دکتر محمدعلی درخشان
عضو هیئت علمی دانشگاه علوم پزشکی شیراز

دکتر هادی بهاری‌فر
عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی

دکتر سیده سارا اثنی‌عشری
عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی

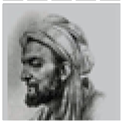
زیر نظر:

دکتر سیدمهدی رضایت، دکتر امیر امانی، دکتر مهدی آدابی، دکتر سعید سرکار
اعضای هیئت علمی گروه نانوفناوری پزشکی دانشگاه علوم پزشکی تهران

عنوان و نام پدیدآور: نانوفناوری پزشکی، روش‌ها وکاربردها/مهدی آدابی ...[و دیگران]؛ زیر نظر سیدمهدی رضایت، امیر امانی، مهدی آدابی، سعید سرکار؛ ناظر فنی نجمه کتابچی
مشخصات نشر: تهران: تعالی اندیشه، ۱۳۹۹.
مشخصات ظاهری: ۲۰۰ص.
فروست: دانش و فناوری؛ ۱۲.
شابک: ۳-۰۳-۸۱۴۹-۶۰۰-978
وضعیت فهرست نویسی: فیپا
یادداشت: مهدی آدابی، سمیه ابراهیمی باروق، سیدمحمد امینی، اسماعیل میرزایی، محمدعلی درخشان، هادی بهاری‌فر، سیده سارا اثنی‌عشری.
موضوع: نانوپزشکی
موضوع: Nanomedicine
موضوع: نانوذرات
موضوع: Nanoparticles
رده بندی کنگره: R۸۵۷
رده بندی دیویی: ۶۱۰/۲۸

ناشر: انتشارات تعالی اندیشه
نام کتاب: نانوفناوری پزشکی، روش‌ها وکاربردها
نویسندگان: مهدی آدابی، سمیه ابراهیمی باروق، سیدمحمد امینی، اسماعیل میرزایی، محمدعلی درخشان، هادی بهاری‌فر، سیده سارا اثنی‌عشری
زیر نظر: دکتر سیدمهدی رضایت، دکتر امیر امانی، دکتر مهدی آدابی، دکتر سعید سرکار، اعضای هیئت علمی دانشگاه علوم پزشکی تهران
ناظر فنی: نجمه کتابچی
شابک: ۳-۰۳-۸۱۴۹-۶۰۰-978
شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه
نوبت چاپ: اول ۱۳۹۹
بها: ۵۵۰۰۰ تومان
حقوق چاپ و نشر، محفوظ و متعلق به ناشر است
پست الکترونیک: taali. andisheh@publicist. com
تلفن: ۸۸۹۹۶۴۳۲- ۰۹۳۰۱۹۳۴۷۹۱

... جمال شاهد ازلی را جز به دیده بصیرت نتوان دید
و به کوی او جز با پیر خرد گذر نتوان کرد
ذات کبریایی او قابل ادراک و ابصار نیست
فروغ او است که در باطن و ظاهر و اشیا جلوه‌گر است
برای این که هر فردی را به کمال مطلوب خویش رساند
از هر موجودی پرتو نور او ساطع است
و در هر ذره از ذرات این نشانه موجود
که اوست خدای یگانه که هستی هر هستی به هستی اوست.



* بخشی از ترجمه فارسی وصیت‌نامه ابوعلی‌سینا

فهرست

پیشگفتار	۹
فصل اول نانوساختارها	۱۱
فصل دوم کاربردهای نانوفناوری در دارو رسانی و سامانه‌های دارو رسانی	۳۷
فصل سوم نانوفناوری در مهندسی بافت و پزشکی ترمیمی	۷۷
فصل چهارم کاربردهای نانوفناوری در تشخیص بیماری‌ها	۱۰۹
فصل پنجم سمیت و ایمنی نانومواد	۱۲۵
فصل ششم تجهیزات و روش‌های مشخصه‌یابی در نانوفناوری	۱۵۵
فصل هفتم کاربرد نانوفناوری در علوم تغذیه و صنایع غذایی	۱۷۱

پیشگفتار

پس از گذشت قریب به دو دهه از ظهور فناوری نانو، دیگر نمی‌توان این فناوری را «نوظهور» نامید. امروزه نه تنها دانشمندان و محققان در سراسر دنیا به اهمیت این فناوری پی برده‌اند، که بسیاری از مردم جامعه نیز با آن آشنا شده‌اند و از محصولات آن به طور مستقیم یا غیرمستقیم استفاده می‌کنند. به تبع سایر علوم، پزشکی نیز بهره بسیاری از این فناوری برده‌است و صد البته باید گفت این فناوری تازه در حال نشان‌دادن جایگاه خود در فناوری‌های نوین پزشکی است. کاربرد نانوساختارهای مختلف در مهندسی بافت تا استفاده از نانوذرات در دارورسانی، تنها گوشه کوچکی از ظرفیت‌های بزرگ فناوری نانو هستند.

کاربرد نانوفناوری در پزشکی در دهه اخیر، به‌طور ویژه‌ای نقل محافل علمی بوده است. محصولات نانویی مرتبط با حوزه سلامت انسان اعم از نانوداروها، نانوزیست‌حسگرها - و اخیرا نانوربات‌ها- در حال ورود به بازار هستند و انتظار می‌رود که در آینده‌ای نزدیک، نقش محصولات نانو در هر حوزه از پزشکی برای کلیه دست‌اندرکاران بهداشت و درمان و عموم مردم پوشیده نباشد.

بااین‌حال، نگاهی دقیق به کتاب‌های منتشرشده در نانوپزشکی نشان می‌دهد که کمتر کتابی توانسته است تمامی مباحث مرتبط با این گرایش گسترده را پوشش دهد که این امر باعث بروز مشکلاتی برای محققان و علاقمندان نانوپزشکی نیز می‌شود. در این راستا کتابی که در پیش رو

دارید، با همکاری تعدادی از دانش‌آموختگان رشته نانوفناوری پزشکی و زیرنظراساتید مجرب به رشته تحریر درآمده‌است و با توجه به حجم آن، تا حد قابل قبولی از این قاعده مستثنا است.
این کتاب در هفت فصل تدوین شده است. فصل اول به معرفی نانوساختارها و کلیاتی پیرامون آن‌ها می‌پردازد. فصل دوم به ابزارها و تکنیک‌های دارورسانی اختصاص یافته‌است. در فصل سوم مروری بر مهندسی بافت و نقش فناوری نانو در توسعه آن صورت گرفته‌است. در فصل چهارم پیرامون حسگرها و نانوزیست‌حسگرها مقدماتی گفته شده‌است. در فصل پنجم مباحث مهم مرتبط با ایمنی کاربرد نانو در پزشکی و سمیت نانومواد ذکر شده‌است. فصل ششم به معرفی اجمالی تجهیزات و روش‌های مشخصه‌یابی در نانوفناوری اختصاص یافته‌است و در پایان، در فصل هفتم و پایانی کتاب،کاربرد نانوفناوری در علوم تغذیه و صنایع غذایی به اجمال توضیح داده شده است.
در مجموع مباحث موجود در این کتاب به دلیل روانی متن و سهولت درک مطالب، بدون نیاز به دانش قابل توجهی در این رشته، جهت مطالعه و فهم عمیق مطالب پایه‌ای نانو در پزشکی به عموم علاقمندان و دانشجویان این رشته پیشنهاد می‌شود.
علاوه‌براین، کتاب حاضر با هدف به‌روزرسانی کتاب پیشین نگاشته شده‌است. در این کتاب برخی از مباحث ویرایش گذشته، در هم ادغام شده و مباحثی مانند کاربرد نانوفناوری در مهندسی بافت و پزشکی بازساختی به آن اضافه شده است.
امیدواریم این کتاب بتواند نیاز دانشجویان و داوطلبان رشته نانوفناوری پزشکی را به یک مرجع ساده و جامع مرتفع کند و مورد توجه دانشجویان و علاقمندان این شاخه از فناوری نانو قرار گیرد.

مؤلفین
اسفند ۱۳۹۹

۱ نانوساختارها

دکتر سیدمحمد امینی

هدف از این فصل، کسب اطلاعات کلی در مورد علوم و فناوری نانو و آشنایی با نانوساختارهای مورد استفاده در علوم پزشکی و زیستی است. در این فصل، به طور خلاصه به معرفی ویژگی‌ها و خواص برخی از پرکاربردترین نانوساختارها در علوم پزشکی خواهیم پرداخت.

۱.۱. مقدمه

مدت زمان مدیدی است که بشر پی به وجود صورت‌های مختلفی از مواد با عناصر مشابه برده است. به‌عنوان‌مثال گرچه در گرافیت و الماس تنها اتم کربن وجود دارد، تفاوت‌های ساختاری عمده‌ای میان این دو ماده دیده می‌شود. علم نانو نیز به مواد در مقیاس نانومتری نگرشی متفاوت دارد. پدیده‌های جدیدی که درواقع از چینش و برهم‌کنش کنترل‌شده اتم‌ها و مولکول‌ها مشاهده می‌شوند، سیستم‌های متفاوتی را بنیان‌گذاری می‌کنند که خواص نوظهور و شگفت انگیزی دارند.

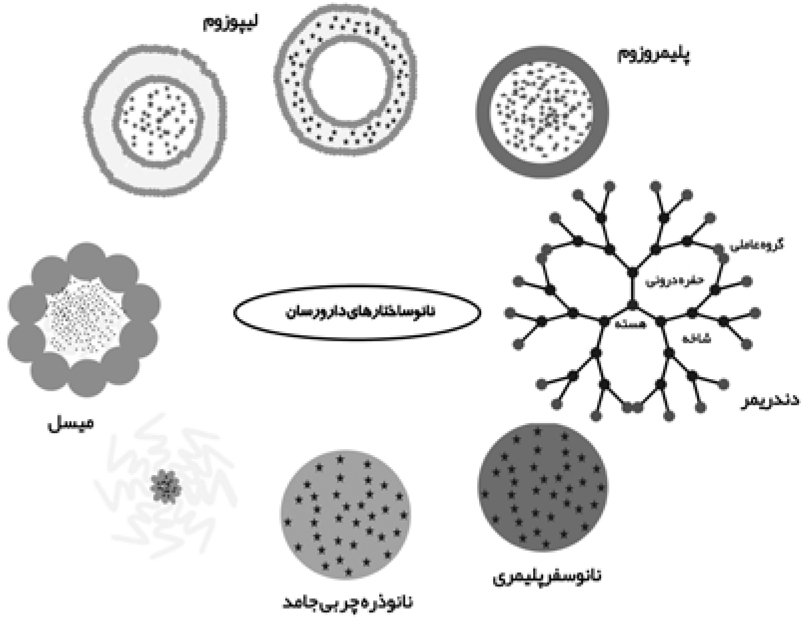
خواص مواد به نوع اتم‌ها یا مولکول‌های تشکیل‌دهنده آن‌ها و نوع اتصال این اتم‌ها و مولکول‌ها به یکدیگر بستگی دارد؛ بنابراین اگر بتوانیم این اجزا را به شکل موردنظر

خودمان به‌هم متصل کنیم، مواد جدیدی با خواص و توانایی‌های مورد نظرمان به‌دست می‌آوریم. این کار هدف اصلی نانوفناوری است. برای درک درست خواص یک ماده باید به ریزساختار آن اشراف داشت و در نانوفناوری با مهندسی ریزساختارِ یک ماده می‌توان خواص و ویژگی‌هایی از آن ماده گرفت که با خواص پیشین کاملاً متفاوت است. این مواد جدید قابلیت‌های گسترده‌ای برای رفع نیازهای مبرم بشر در حیطه‌های مختلف صنعت و فناوری دارند [۱].

فناوری نانو، رشته‌ای از دانش کاربردی نانو است که حوزه‌های مختلفی را پوشش می‌دهد. موضوع اصلی آن نیز مهار ماده یا دستگاه‌های در ابعاد حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. مواد اطراف ما از سه بعد تشکیل شده‌اند. اگر حداقل یکی از این ابعاد در مقیاس نانو (بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) باشد، به آن یک ماده نانوساختار گفته می‌شود. به بعدی که در مقیاس نانو نباشد، اصطلاحاً بعد آزاد گفته می‌شود؛ زیرا هر مقداری می‌تواند داشته باشد. این تعاریف و اندازه‌ها درواقع اهمیت مکانیک کوانتومی را برجسته می‌کنند و موجب بروز پدیده‌ها و خواص خارق‌العاده نانوفناوری می‌شوند. مواد نانوساختار دارای انواع مختلفی می‌باشند که شامل صفربعدی (در هر سه بعد دارای اندازه نانومتری، مانند نانوذرات کروی)، یک‌بعدی (دارای یک بعد آزاد، مانند نانوالیاف) و دوبعدی (دارای دو بعد آزاد، مانند نانوفیلم‌ها) هستند [۲].

برای درک درست از مواد و قابلیت‌های آن‌ها در علم نانو، علاوه بر درک صحیح از دانش مکانیک نیوتنی و الکترومغناطیس ماکسول، بایستی مکانیک کوانتومی را نیز به‌کار گرفت. باید توجه داشت که فضای کاربردی نانو در اندازه‌های مابین اتمی و توده‌ای (بالک) است. در بسیاری از موارد، قوانین و محدودیت‌های کوانتومی در این اندازه‌ها غالب هستند؛ لذا در طول این فصل برای درک درست از خواص نانوساختارهای مطرح‌شده، در مواردی به ناچار نگاهی به بعضی از پدیده‌های کوانتومی مختص نانوساختارها نیز داریم.

در این فصل همچنین سعی شده است انواع مختلفی از نانوساختارهایی که کاربرد بیشتری در نانوفناوری پزشکی دارند مثال زده شود. بنابراین برخی از نانوساختارها مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. نانوحامل‌های دارویی و نانوساختارهایی که توانایی دارورسانی را دارند (شکل ۲-۱) به‌طور مفصل موردبحث قرار خواهند گرفت. توجه به این نکته ضروری است که ویژگی‌های زیستی، بیوشیمیایی و فیزیکی بدن انسان



شکل ۲-۱: رایج‌ترین نانوساختارهای دارورسان

در بسیاری از موارد بسیار پیچیده یا حتی ناشناخته هستند. به‌علاوه، لزوم اطمینان از تأمین سلامت انسان و محیط زیست به هنگام کاربرد بالینی نانوساختارها، باعث شده است استفاده پزشکی از نانوساختارها نیازمند آزمون‌ها و بررسی‌های بسیار دقیق باشد. به دلیل این محدودیت‌ها بسیاری از نانوساختارهای ذکرشده در این فصل در مرحله تحقیق و توسعه هستند و هنوز به کاربرد بالینی نرسیده‌اند [۱].

۲.۱. نانوسوسپانسیون‌ها

به مخلوط غیرهمگنی که از پخش‌شدن ذرات جامد در مایع به‌وجود می‌آید، سوسپانسیون می‌گویند. نانوسوسپانسیون، سیستم کلوئیدی با فاز پراکنده و دارای اندازه‌های زیرمیکرون است که کاربردهای زیادی در پزشکی و داروسازی دارد. سوسپانسیون‌ها می‌توانند به اشکال مختلفی و با مواد مختلفی مانند پلیمرها، مواد معدنی و... ساخته شوند [۳].

ازجمله نانوسوسپانسیون‌ها می‌توان به نانوذرات لیپیدی جامد اشاره کرد (شکل ۲-۱).

این ساختارها از تجمع مولکول‌های چربی در آب تهیه می‌شوند که از سیستم‌های دارورسانی جدید در تحقیقات دارورسانی هستند. همچنین این ساختارها برای پایدارسازی معمولاً نیاز به سورفکتانت دارند و دارای پایداری مناسبی هستند [۴].
گروه دیگری از مواد نانوسوسپانسیون که به‌شکل گسترده در تحقیقات دارورسانی کاربرد دارند، نانوسوسپانسیون‌های پلیمری هستند [۵]. ساده‌ترین این نانوساختارها نانوسفرهای[1] پلیمری‌اند (شکل ۲-۱) که از پلیمرهای مختلف ساخته می‌شوند و مانند نانوذرات لیپیدی جامد در برخی موارد، برای پایداری بیشتر نیاز به سورفکتانت دارند.
دندریمرها نیز از ساختارهای پلیمری سنتزی شاخه‌دار هستند که معروف‌ترین آن‌ها PAMAM[2] است. ویژگی‌های بی‌نظیر دندریمرها شامل توزیع اندازه یکسان، شاخه‌های زیاد، حلالیت مناسب در آب، وجود حفره‌های درونی و امکان حضور گروه‌های عاملی مختلف روی سطح، آن‌ها را برای تحقیقات دارورسانی و زیست‌فناوری کاربردی کرده است[۶].
در استفاده از نانوساختارهای پلیمری، باید به زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیربودن پلیمرها توجه بیشتری داشت. از پلیمرهای زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر کاربردی در تحقیقات دارورسانی می‌توان به کیتوزان، ژلاتین، پلی‌لاکتیک‌اسید و پلی‌گلیکولیک‌اسید اشاره کرد [۷].

۳.۱. نانوامولسیون‌ها

دسته دیگری از سیستم‌های کلوئیدی امولسیون‌ها هستند. یک امولسیون از دو مایع امتزاج‌ناپذیر (معمولاً روغن و آب) تشکیل شده است که یکی از آن‌ها به صورت قطرات ریز در دیگری پراکنده شده است. مایع پراکنده‌شده فاز پراکنده یا داخلی و مایع احاطه‌کننده قطرات، فاز پیوسته یا خارجی نامیده می‌شود.
یکی از نانوساختارهایی که از مولکول‌های دوگانه‌دوست ساخته می‌شوند، میسل‌ها هستند (شکل ۲-۱). میسل‌ها ازطریق آب‌پوشی تجمعات مولکول‌های دوگانه‌دوست در غلظت بالای غلظت حد بحرانی[3] شکل می‌گیرند. میسل‌ها به اشکال مختلفی مانند کروی، مخروطی و هگزاگونال[4] وجود دارند [۸].

1 Polymeric Nanospheres
2 Polyamidoamine
3 Critical micelles Concentration
4 Hexagonal

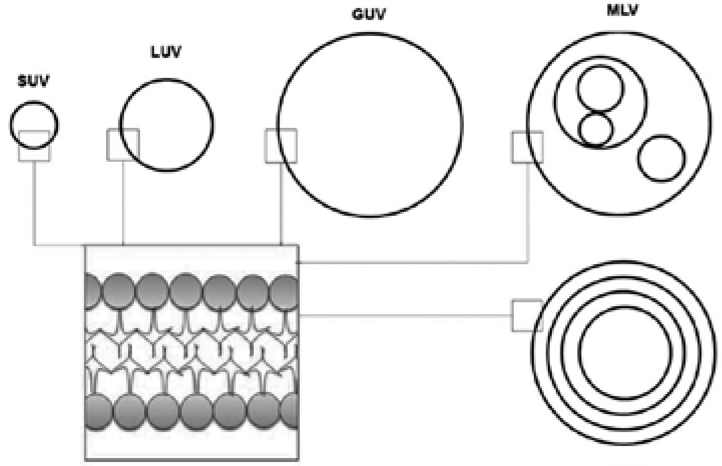
ساخت میسل‌های پلیمری از پلیمرهای دوگانه‌دوست نیز امکان‌پذیر است و به علت گوناگونی پلیمرهای مختلف، بارگذاری انواع دارو در میسل‌ها و نانوذرات پلیمری برای غلبه بر چالش‌های مختلف زیستی، موردتوجه بسیاری از محققان است [۶].

۱. ۴. وزیکول‌ها

در یک تعریف دقیق، وزیکول کیسه‌ای پوسته‌مانند می‌باشد که به ترابری و اندوختن مواد می‌پردازد. به‌طور معمول وزیکول‌ها دست‌کم از یک لایه دوجداره فسفولیپیدی یا پلیمری تشکیل شده‌اند [۹]. وزیکول‌ها به‌طور طبیعی در تمامی سلول‌ها وجود دارند؛ اما در اینجا ملاک صرفاً وزیکول‌هایی هستند که به‌صورت مصنوعی نیز ساخته می‌شوند. این ساختارها شامل لیپوزوم‌ها، نیوزوم‌ها و پلیمروزوم‌ها هستند.

۱. ۴. ۱. لیپوزوم‌ها

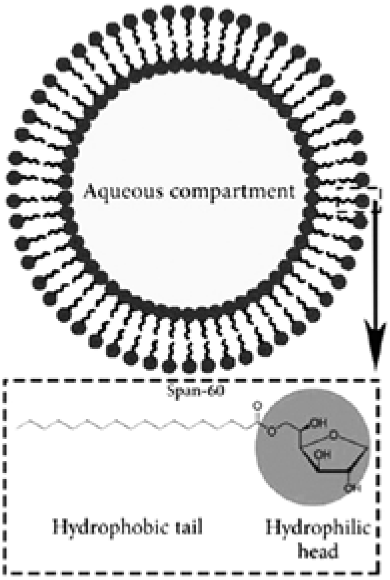
لیپوزوم‌ها ساختارهای کروی هستند که شامل یک هسته آبی محصورشده بین یک یا چند دولایه لیپیدی می‌باشند. این وزیکول‌ها، دارای حداقل یک دولایه فسفولیپیدی هستند که غالباً یک فضای آبی را احاطه کرده است. تقسیم‌بندی ساختاری لیپوزوم‌ها



شکل ۲: نمای شماتیک از انواع وزیکول‌های لیپوزومی و غشای دولایه لیپیدی. GUV(وزیکول تک‌لایه غول‌پیکر [1])، LUV (وزیکول تک‌لایه بزرگ [2])، SUV (وزیکول تک‌لایه کوچک [3]) MUV (وزیکول چندلایه [4]) [۱۰]

---

1 Giant unilamellar vesicle
2 Large unilamellar vesicle
3 Small unilamellar vesicle
4 Multilamellar vesicle



شکل ۲-۳. نمای شماتیک از نیوزوم‌های تشکیل شده از منواستئارات‌سوربیتان [۱۲]

بر مبنای اندازه و تعداد دولایه‌های لیپیدی است (شکل ۲-۲).
لیپوزوم‌ها به دلیل ساختار ویژه‌ای که نسبت به سایر سیستم‌های دارورسانی دارند، می‌توانند داروهایی با چربی‌دوستی متفاوت را در خود جای دهند. به‌این‌ترتیب که لیپوزوم در غشای دولایه خود یک فضای آب‌گریز[۲] و در هسته خود یک فضای آب‌دوست[۳] را فراهم می‌کند که می‌تواند به‌طور همزمان ترکیبات آب‌دوست و آب‌گریز را در خود بارگذاری کند. داروهای بسیار چربی‌دوست، به‌طور کامل در دولایه لیپیدی و داروهای بسیار آب‌دوست، منحصراً در هسته آبی قرار می‌گیرند. داروهایی با حلالیت متعادل در روغن و آب، هم در دولایه‌های لیپیدی و هم در هسته آبی توزیع می‌شوند [۹]. ویژگی‌هایی ازقبیل سمیت ذاتی پایین و زیست‌تخریب‌پذیری مناسب لیپوزوم‌ها، سبب شده است که آن‌ها به‌خصوص در سیستم‌های دارورسانی موردتوجه ویژه‌ای واقع شوند. لیپوزوم‌ها ممکن است از فسفولیپیدهای طبیعی یا مصنوعی (سنتزی) تشکیل شده

1 Sorbitan monostearate (Span-60)
2 Hydrophobic
3 Hydrophilic

باشند. لیپوزوم‌هایی که از فسفولیپیدهای طبیعی تشکیل می‌شوند، از نظر زیستی بی‌اثرند، ایمنی‌زایی کمی دارند و ایجاد سمیت نمی‌کنند. همچنین لیپوزوم‌ها زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر هستند و ازاین‌جهت نیز بسیار موردتوجه می‌باشند [۱۱].

۱. ۴. ۲. نیوزوم‌ها

نیوزوم‌ها وزیکول‌های دولایه تشکیل‌شده از سورفکتانت‌های غیریونی هستند. عموماً در کنار این سورفکتانت‌ها، کلسترول یا مشتقات آن نیز در ساختار نیوزوم‌ها به‌کار گرفته می‌شود. نیوزوم‌ها مانند سیستم‌های وزیکولی لیپوزومی توانایی کپسوله‌کردن همزمان داروهای آب‌دوست و آب‌گریز را دارند. شکل ۳ نمای شماتیک نیوزوم تشکیل‌شده از یک سورفکتانت به نام اسپن ۶۰[1] را نشان می‌دهد.

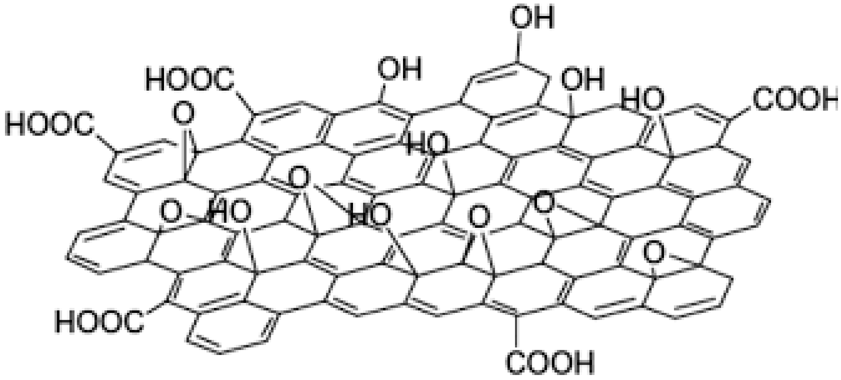
سورفکتانت‌ها ترکیبات شیمیایی هستند که در ساختار مولکولی خود دو ناحیه مشخص از لحاظ حلالیت (یک ناحیه آب‌دوست و یک ناحیه چربی‌دوست) دارند. سورفکتانت‌ها بر اساس نوع گروه آب‌دوست خود به گروه‌های کاتیونی، آنیونی، آمفوتری[2] و غیریونی تقسیم می‌شوند. در ساختار نیوزوم‌ها، سورفکتانت‌های غیریونی‌ای به‌کار می‌روند که قسمت آب‌دوست آن‌ها فاقد بار باشد. چهار گروه اصلی سورفکتانت‌های غیریونی استفاده‌شده در فرمولاسیون‌های نیوزومی، شامل ترکیبات آلکیل‌استر، آلکیل‌آمید، آلکیل‌اتر و استرهای اسیدهای چرب می‌باشند [۱۳].

۱. ۴. ۳. پلیمروزوم

نانوکپسول‌های پلیمری نیز مانند لیپوزوم‌ها، وزیکول‌هایی هستند که می‌توانند دارو را در فضای داخلی خود محصور کنند. این ساختارها دارای پایداری بیشتری نسبت به لیپوزوم‌ها هستند و از پلیمرهای سنتزی دسته‌ای[3] دوگانه‌دوست ساخته می‌شوند. این وزیکول‌ها توانایی کپسوله‌کردن مولکول‌هایی مانند دارو را در داخل فضای داخلی خود دارند. ماهیت سنتزی پلیمرهای مورداستفاده در این ساختارها، امکان ایجاد تغییرات فیزیکوشیمیایی متفاوتی مانند پایداری، شیمی سطح و... را جهت کاربردهای مختلف داروسازی فراهم می‌آورد [۶].

پلیمرهای دسته‌ای متفاوتی برای ساخت نانوکسپول‌ها استفاده می‌شوند و مانند لیپیدهای مورداستفاده در ساخت لیپوزوم‌ها، این اجزا از دو قسمت آب‌دوست و

1 Span 60
2 Amphoteric
3 Synthetic block copolymers



شکل ۲-۴: ساختار شماتیک اکسید گرافن [۱۹]

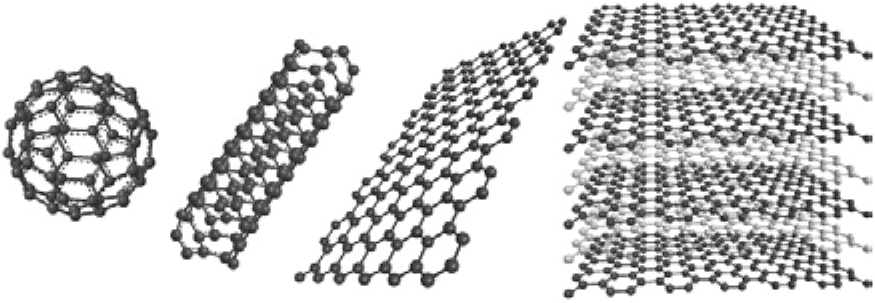
آب‌گریز تشکیل شده‌اند. یکی از پلیمرهایی که به‌صورت گسترده در ساخت پلیمرهای سنتزی دسته‌ای استفاده می‌شود، پلی‌اتیلن‌گلیکول است که پلیمری آب‌دوست و موردتأیید FDA[1] برای استفاده بالینی است. وزن مولکولی اجزای پلیمر سنتزی دسته‌ای، نقش مهمی در ضخامت و پایداری فرمولاسیون پلیمروزومی دارد [۱۴].

۱. ۵. نانوساختارهای کربنی

کربن از شگفت‌ترین عناصر طبیعت است که نانوساختارهای مختلفی از آن وجود دارد. ترکیباتی همچون الماس، گرافیت، نانوالیاف کربنی[2]، فولرن‌های[3] مختلف و گرافن از جمله موادی هستند که توسط کربن ساخته شده‌اند. گرافن جدیدترین عضو خانواده مواد کربنی است [۱۵]. فولرن C_{60} به‌عنوان یک نانوماده صفربعدی، نانولوله‌های کربنی به‌عنوان نانوماده یک‌بعدی و گرافیت به‌عنوان یک ماده سه‌بعدی که از چندین و چند صفحه گرافنی تشکیل شده است، درنظر گرفته می‌شوند (شکل ۲-۵) [۱۶]. هر سه این نانوساختارها دارای هیبریداسیون SP^2 هستند و درواقع اصطلاح فولرن برای هر نوع دگرشکل مولکولی کربنی متفاوت از انواع رایجی مانند الماس، گرافیت و گرافن[4] به‌کار می‌رود.

در اینجا سه گروه از پرکاربردترین فرم‌های نانوکربن در علوم پزشکی، یعنی ترکیبات گرافنی، فولرن‌ها و نانولوله‌های کربنی که دارای هیبریداسیون SP^2 هستند، معرفی

1 Food and Drug Administration
2 Carbon Nanofibers
3 Fullerene (form spheres or tubes)
4 Graphene



شکل ۲-۵: ساختارهای متفاوت کربنی با هیبریداسیون sp^2 (A): فولرن C_{60} (B): نانولوله کربنی (C): گرافن (D): گرافیت [۲۲]

می‌شوند. این ساختارها در شکل ۲-۵ نشان داده شده‌اند.

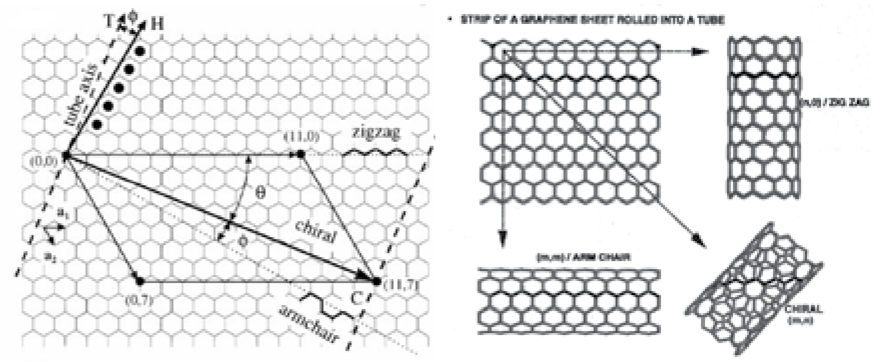
۱.۵.۱. گرافن

گرافن یک لایه از چیدمان اتم‌های کربن در یک صفحه، یا به عبارتی در دو بعد است. این ماده ضخامتی برابر با قطر اتم کربن دارد و به سبب همین ضخامت نانومتری و علیرغم تراکم اتمی بالا، نور را به‌راحتی از خود عبور می‌دهد و همچنین مساحت سطحی[1] بسیار بالایی از خود نشان می‌دهد (شکل ۲-۳ و شکل ۲-۲). گرافن هدایت حرارتی و الکتریکی بالایی دارد و یکی از مستحکم‌ترین مواد شناخته‌شده در جهان است. ترکیب گرافن با پلیمرهای مختلف، کامپوزیت‌هایی با کاربردهای بسیار ممتاز و شگفت‌انگیز ایجاد می‌کند [۱۵، ۱۷]. گرافن به علت خاصیت انعطاف‌پذیری بالایی که دارد، در ایمپلنت‌های مصنوعی و در کاربردهای مهندسی بافت استفاده می‌شود. به‌منظور اصلاح ساختار، به‌آسانی می‌توان گرافن را با ترکیباتی مانند هیدازین اکسید کرد و ترکیبات مختلف اکسیدی از گرافن به‌دست آورد (شکل ۲-۴). ترکیبات اکسیدگرافنی دارای خواص نوری جذابی مانند فلورسانس یا جذب بالای نور مادون‌قرمز هستند که در کاربردهای پزشکی قابل‌استفاده‌اند [۱۸].

۲.۵.۱. باکی‌بال

اولین فولرن باعنوان «Bucky Ball» در سال ۱۹۸۵ کشف شده است. باکی‌بال‌ها شبیه یک توپ فوتبال هستند و شامل ۶۰ اتم کربن (C_{60}) در یک ساختار کروی می‌باشند.

1 Surface area



شکل ۲-۶: ارتباط بین شبکه کربنی و بردار کایرال نانولوله‌های کربنی. (A): اگر صفحه گرافنی نانولوله‌های تک‌دیواره را در امتداد دو خط‌چین باز کنیم، می‌توانیم با سه فرم مختلف نانولوله‌های کربنی بر اساس بردار کایرال آشنا شویم و مختصات هر کدام را رسم کنیم. (B): شماتیک صفحه گرافنی باز و سه نوع مختلف نانولوله کربنی حاصل برحسب بردار کایرال [۲۳].

این کشف منجر به گسترش تحقیقات روی C_{60} و ساختن ساختارهایی مانند نانولوله‌های کربنی گردید. ساختمان C_{60} دارای ۲۰ وجه شش‌گوشه و ۱۲ وجه پنج‌گوشه است. مقاومت گرمایی بالا و هدایت‌پذیری الکتریکی بالا از خواص ترکیبات آن می‌باشد [۲۰]. فولرن C_{60}، دارای خواص جالب زیستی نیز هست؛ به‌عنوان‌مثال با تابش نور ازطریق ایجاد گونه‌های اکسیژن فعال (مانند رادیکال‌های آزاد اکسیژن) می‌تواند باعث ازبین‌بردن میکروارگانیسم‌ها (مانند باکتری‌ها) و سلول‌های سرطانی شود [۲۱].

۱. ۵. ۳. نانولوله‌های کربنی

این دگرشکل[1] کربن، با خواص بی‌نظیرش یکی از پرکاربردترین مواد در نانوفناوری است. هدایت گرمایی بسیار بالا و خواص الکتریکی و مکانیکی شگفت‌انگیز، این ترکیبات را به‌عنوان یکی از افزودنی‌های اصلی بسیاری از مواد ساختاری امروزی، مانند فولاد، پلاستیک و... تبدیل کرده است. نانولوله‌های کربنی به دو گروه نانولوله‌های کربنی یک‌دیواره و چنددیواره تقسیم می‌شوند. اگر ورقه‌ای گرافنی را خم کنیم و دو طرف آن را به هم وصل کنیم، یک نانولوله کربنی یک‌دیواره درست کرده‌ایم. نحوه خم‌کردن در شکل ۲-۶ نشان داده شده است.

گرافن یک تک‌لایه مولکولی از اتم‌های کربنی است که در دو بعد قرار دارد. صفحه گرافنی را با دو عدد نشان می‌دهند (m,n). در واقع m و n نشان‌دهنده مختصات

1 Allotrope

بردار کایرال در صفحه گرافنی هستند ($R = na1 + ma2$). اگر m برابر با صفر باشد، فرم نانولوله کربنی ایجادشده زیگ‌زاگ نامیده می‌شود و اگر m و n برابر باشند، نانولوله دارای فرم صندلی است؛ درغیراین‌صورت نانولوله ایجادشده دارای فرم نامتقارن یا کایرال است. خواص الکتریکی و گرمایی نانولوله‌های کربنی بستگی به فرم لوله‌شدن صفحه گرافنی دارد؛ به‌عنوان‌مثال نانولوله به فرم صندلی، رسانا، نانولوله به فرم زیگ‌زاگ، نیمه‌رسانا و فرم کایرال، نارسانا است.

۱. ۶. نانوساختارهای فلزی

در نانوساختارهای فلزی خواص بی‌نظیر شیمیایی، الکتریکی، نوری و مغناطیسی دیده می‌شود که کاملاً متفاوت از خواص مواد توده‌ای (بالک) آن‌هاست. این خواص بی‌نظیر و جدید موجب ایجاد کاربردهای فراوان در صنایع مختلف و مخصوصاً در علوم زیستی و پزشکی شده است. نانوذرات نقره و طلا از نانوساختارهای فلزی پرکاربرد در علوم پزشکی هستند که در این بخش معرفی می‌گردند.

۱. ۶. ۱. نانوذرات طلا

طلا فلزی زرد و درخشنده است که ازلحاظ مغناطیسی، دیامغناطیس است و جزو فلزات بی‌اثر محسوب می‌شود؛ اما نانوساختارهای طلا به علت محدودیت‌های کوانتومی اعمال‌شده بر الکترون‌های سطحی نانوساختار، خواص کاملاً متفاوتی را بروز می‌دهند. خوشه‌های بسیار ریز می‌توانند فرومغناطیس باشند یا آن‌قدر از لحاظ شیمیایی فعال باشند که به‌عنوان کاتالیزور واکنش‌های شیمیایی عمل کنند [۲۴]. نانوساختارهای طلا در اشکال مختلفی مانند کره، میله، مکعبی، مثلث، ستاره، قفس‌مانند و... تهیه می‌شوند و بسته به شکل و اندازه ذرات، شدت و بیشینه جذب و پراکندگی نور در ناحیه مرئی و فرابنفش آن‌ها متغیر است و موجب ایجاد رنگ‌های متفاوت از این نانوساختارها می‌شود [۲۵].

علت جذب نور توسط این نانوساختارها و ایجاد رنگ‌های متنوع مرتبط به پدیده‌ای کوانتومی به نام تشدید پلاسمون سطحی است. در این فرایند تحت تابش نور، الکترون‌های آزاد فلز (الکترون‌های رسانش) مورد نوسان قرار می‌گیرند و درنتیجه نور، در طول‌موج‌های مشخصی جذب می‌شود که این طول‌موج‌ها وابسته به شکل و اندازه نانوذرات است. به مجموع الکترون‌ها و حفره‌ها در مکانیک کوانتوم، پلاسمون گفته می‌شود. در این بخش برخی از نانوساختارهای طلا و کاربردهای زیستی آن‌ها ذکر می‌شوند.

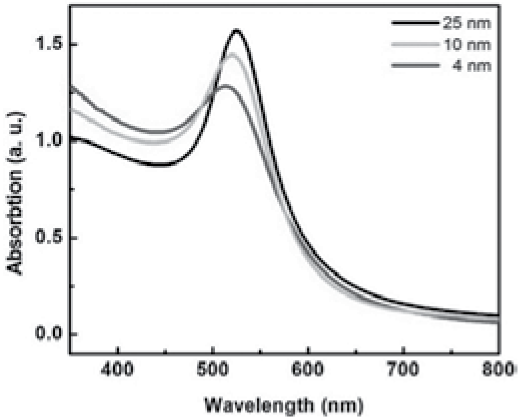
شکل ۲-۷: تصویر جام لیکرگوس به رنگ قرمز با نور عبوری و به رنگ سبز با نور بازتابی [۲۶]

• نانوذرات کروی طلا

اولین نانوفلزات ساخته دست بشر به قرن‌ها پیش باز می‌گردد. استفاده از ذرات کوچک فلزی (کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر) در لعاب‌های سفالگری و پنجره‌های کلیساها، به قرون وسطی باز می‌گردد. یکی از این نمونه‌ها جام لیکرگوس است که در موزه‌ای در لندن در معرض نمایش قرار دارد. شکل ۲-۷ تصویر این جام را نشان می‌دهد. اگر به این جام، از بیرون نور تابانده شود به رنگ سبز دیده می‌شود و اگر به داخل جام نور تابانده شود، قرمز می‌شود. رنگ قرمز به دلیل وجود مقادیر بسیار کمی از نانوذرات طلا در آن است که باعث پراش نور و درنتیجه تغییر رنگ می‌شود [۲۶].

سنتز آسان، تولید با قابلیت کنترل اندازه ذره و بیشینه جذب نوری در ناحیه nm ۵۰۰ - ۶۰۰، باعث شده است که نانوذرات کروی طلا پرکاربردترین نوع نانوساختارهای طلا باشند؛ زیرا تغییرات رنگی در این طول‌موج‌ها به‌راحتی با چشم غیرمسلح دیده می‌شود. بیشینه طول‌موج جذب این ساختارها با افزایش اندازه ذره به طول‌موج‌های بیشتر جابه‌جا می‌شود (شکل ۲-۸) [۲۷]. از مهم‌ترین کاربردهای نانوذرات طلا می‌توان به استفاده در بهبود عملکرد سنسورهای SPR[1]، SERS[2] و

1 Surface plasmon resonance
2 Surfaced enhanced raman spectroscopy

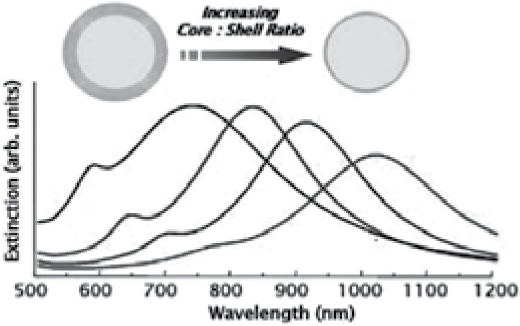


شکل ۲-۸: طیف جذبی نانوذرات کروی طلا با اندازه‌های مختلف، بیشینه طول‌موج جذبی مربوط به SPR با بزرگ‌شدن ذره به طول‌موج‌های بیشتر انتقال می‌یابد [۳۰].

سنسورهای الکتروشیمیایی اشاره کرد [۲۸]. محققان بیان کرده‌اند که نانوساختارهای طلا باعث بهبود عملکرد روش‌های درمانی متفاوتی، مانند نورپویادرمانی[۱]، نورگرمادرمانی[۲] و پرتودرمانی سرطان می‌شوند [۲۹].

• نانوپوسته‌های طلا[۳]

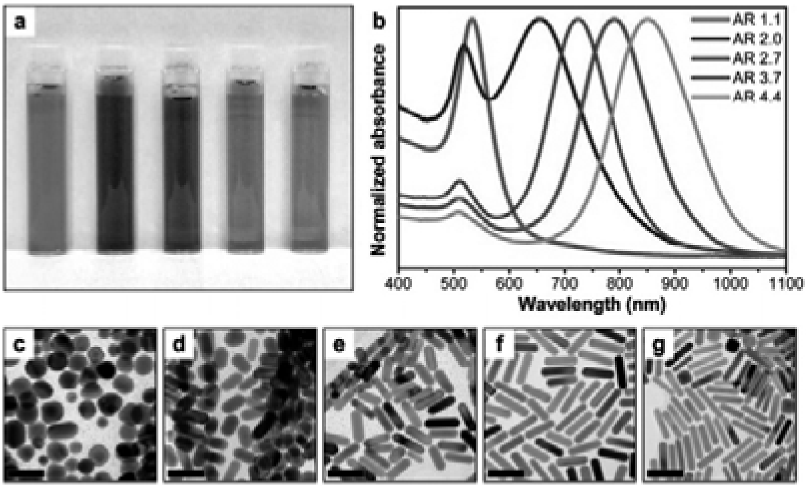
این ساختارها معمولاً دارای هسته‌ای از جنس یک ماده دی‌الکتریک[۴] مانند سیلیکا و پوسته چند نانومتری طلا هستند که دارای بیشینه جذب از ناحیه مرئی تا ناحیه فروسرخ نزدیک (NIR[5]) می‌باشند. برای تهیه این ساختارها، روی ذرات سیلیکا با گروه آمین، نانوذرات کوچک طلا نشانده می‌شود و در ادامه، با احیا بیشتر یون‌های



شکل ۲-۹: (A): طیف جذبی مرئی- فرابنفش نانوذرات کروی طلا با اندازه‌های مختلف، بیشینه طول‌موج جذبی مربوط به SPR با بزرگ‌شدن ذره به طول‌موج‌های بیشتر انتقال می‌یابد [۲۷]. (B): طیف جذبی مرئی- فرابنفش نانوپوسته‌های طلا، با افزایش نسبت قطر هسته سیلیکا به قطر پوسته طلا، بیشینه طول‌موج جذبی نانوذره به طول‌موج‌های بالاتر انتقال می‌یابد [۳۱].

---

1 Photodynamic therapy
2 Photothermal therapy
3 Gold nanoshells
۴ دی‌الکتریک یک عایق الکتریکی است که با اعمال میدان الکتریکی، می‌تواند قطبی شود
5 Near Infrared



شکل ۲-۱۰: (A) تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانومیله‌های طلا با نسبت اندازه‌های مختلف، (B) تصاویر اپتیکی نانومیله‌های طلا با نسبت اندازه‌های مختلف و (C) طیف جذب اپتیکی نانومیله‌های طلا با نسبت اندازه‌های مختلف [۳۲].

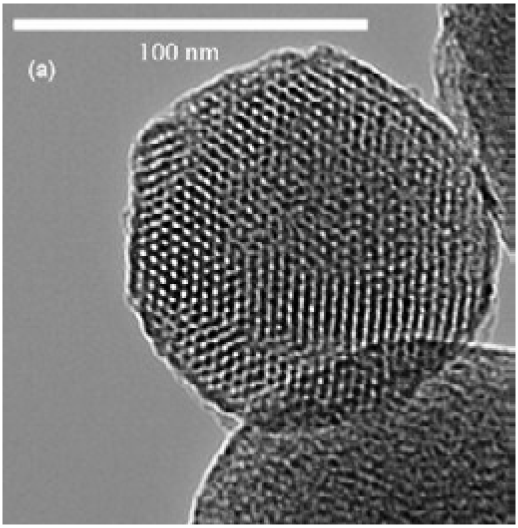
طلا، پوسته‌ای چند نانومتری روی هسته سیلیکا تشکیل می‌شود. طول‌موج بیشینه جذبی نانوذره به‌شدت وابسته به نسبت ضخامت پوسته به قطر هسته سیلیکا است؛ به‌طوری‌که با کاهش این نسبت، طول‌موج جذبی به طول‌موج‌های بالاتر در ناحیه مادون‌قرمز انتقال داده می‌شود (شکل ۲-۹)[۳۱].

- **نانومیله‌های طلا**

نانومیله‌های طلا به دلیل سطح مقطع جذب نور بیشتر نسبت به سایر نانوساختارهای طلا، جذب قابل‌کنترلی در ناحیه فروسرخِ نزدیک برای کاربردهای گرمادرمانی دارند. این ساختارها دارای دو بیشینه جذب هستند که به تشدید پلاسمون‌ها در عرض نانومیله و تشدید پلاسمون‌ها در طول نانومیله نسبت داده می‌شوند. فاکتور تعیین‌کننده در بیشینه جذب مرتبط با تشدید پلاسمون‌های طولی، نسبت طول به عرض است. با تغییر این پارامتر جذب پلاسمون‌های طولی نانومیله در ناحیه NIR قابل تنظیم است (شکل ۲-۱۰) [۳۲].

۲.۶.۱. نانوذرات نقره

شاید مهم‌ترین و شناخته‌شده‌ترین خاصیت نانوذرات نقره، خواص ضدمیکروبی آن‌ها باشد. درواقع از زمان‌های باستان، نقره و بعضاً نانوذرات آن به صورت یک عامل



شکل ۲-۱۱: میکروگراف میکروسکوپی الکترونی تهیه‌شده از نانوذرات سیلیکا مزوپور [۴۱].

ضدباکتری کاربرد داشته‌اند؛ به‌عنوان‌مثال رومی‌ها نوشیدنی‌ها را برای جلوگیری از فاسدشدن، در کوزه‌های نقره نگهداری می‌کرده‌اند. امپراتورهای چین با قاشق‌های نقره برای سلامتی بهتر غذا می‌خورده‌اند و آمریکایی‌ها با قراردادن سکه‌های نقره درون ظرف آب و شیر، قادر به نگهداری این مایعات در مدت زمان طولانی بودند. در جنگ جهانی اول نیز ورقه‌های نقره به‌عنوان پوششی برای زخم‌ها و جلوگیری از عفونت به‌کار رفته‌اند. استفاده از هالید نقره برای عکاسی، در اواسط قرن نوزدهم توسط داگور [۱] و تالبوت [۲] یکی دیگر از کشفیات مهم بشر بود [۳۳].

علاوه بر خواص ضدمیکروبی نانوذرات نقره در شکل‌ها و اندازه‌های مختلف، این نانوساختارها کاربردهای فراوانی در علوم پزشکی دارند. ازجمله این کاربردها می‌توان به استفاده از این نانوساختارها برای تقویت سیگنال طیف‌سنجی رامان مولکول‌ها و آنالیت‌های زیستی [۳۴]، استفاده از خواص الکتروشیمایی نانوساختارهای نقره در ساخت زیست‌حسگرها [۳۵]، استفاده از خواص کاتالیستی قوی نانوذرات نقره [۳۶]، استفاده در ساخت سایر نانوساختارها [۳۱] و استفاده از خواص نوری نانوذرات نقره برای ساخت برچسب کالاها [۳۷] اشاره کرد.

1 Daguerre
2 Fox Talbot

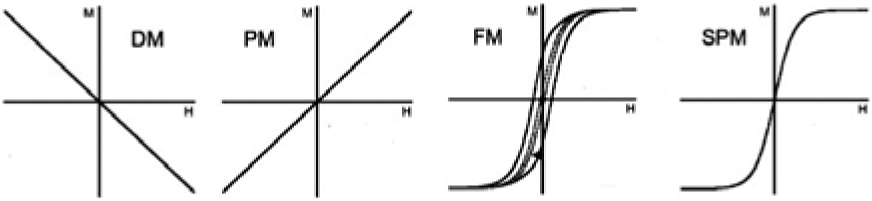
۷.۱. نانوذرات سیلیکا

سیلیکا یا دی‌اکسیدسیلیکون ماده اصلی شیشه است. دو مورد از نانوساختارهای پرکاربرد، سیلیکا آئروژل[1] و سیلیکای نیمه‌متخلخل[2] هستند. آئروژل یک ساختار بسیار متخلخل از سیلیکا است که بیشتر حجم آن را حفرات هوا تشکیل داده است. این ماده هدایت گرمایی و الکتریکی بسیار کمی دارد؛ بنابراین به‌عنوان عایق در بسیاری از موارد کاربرد دارد [۳۸]. سیلیکای نیمه‌متخلخل (مزوپور) در کاربردهای پزشکی کاربرد بیشتری دارد؛ به‌طوری‌که می‌توان حفرات این نانوساختار را با دارو بارگذاری کرد و برای کاربردهای مختلف دارورسانی به‌کار گرفت [۳۹].

مواد متخلخل بسته به اندازه خود به انواع مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند. براساس نمادگذاری IUPAC مواد میکروپور موادی هستند که قطر حفره آن‌ها کمتر از ۲ نانومتر است و مواد ماکروپور موادی هستند که قطر حفره آن‌ها بیشتر از ۵۰ نانومتر می‌باشد و مزوپور در دسته بین این دو گروه قراردارد [۴۰].

نمونه میکروگراف‌های تهیه‌شده از نانوذرات سیلیکای مزوپور در شکل ۲-۱۱ آمده است. ازجمله مزایای مهم مواد مزوپور، امکان تنظیم اندازه تخلخل این مواد با تغییر در قالب‌های تهیه‌شده در حین فرایند ساخت آن‌ها است؛ به‌این‌ترتیب امکان قرارگیری مولکول‌های دارویی با اندازه‌های مختلف در این نانوحامل‌ها فراهم می‌شود [۴۱].

حفرات این نانوذرات را می‌توان با رنگ‌های فلورسنت نیز بارگذاری کرد و از این ساختارها برای کاربردهای تشخیصی یا به‌عنوان زیست‌حسگر استفاده کرد [۴۲].



شکل ۲-۱۲: پاسخ مواد مختلف به میدان مغناطیس خارجی. DM: دیامغناطیس، PM: پارامغناطیس، FM: فرومغناطیس، SPM: سوپرپارامغناطیس [۴۵].

---

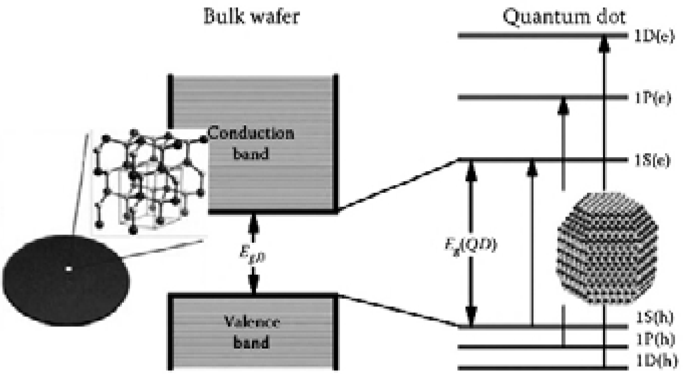
1 Aerogel
2 Mesoporous Silica

۸.۱. نانوذرات مغناطیسی

به دسته‌ای از نانوساختارها که به میدان مغناطیسی پاسخ می‌دهند، نانوذرات مغناطیسی گفته می‌شود. این نانوساختارها به‌طور معمول حاوی دو جزء هستند. جزء اول، یک ماده مغناطیسی مانند آهن، نیکل، کبالت یا سایر مواد است که به میدان مغناطیس پاسخ می‌دهد و جزء دیگر یک ترکیب شیمیایی است که برای پایدارسازی یا افزودن عملکردهای دیگر، مانند هدفمندی، به نانوساختار اضافه می‌شود [۴۳].

با بررسی مغناطیسی‌شدن مواد در حضور میدان مغناطیسی خارجی، می‌توان خصوصیات مغناطیسی مواد را بررسی کرد (شکل ۲-۱۰). مواد به‌طور معمول به سه دسته کلی فرومغناطیس (مغناطش دائم)، پارامغناطیس (تحت اثر میدان مغناطیسی خارجی، میدان مغناطیسی القایی هم‌جهت اما کوچک، نشان می‌دهند) و دیامغناطیس (تحت اثر میدان مغناطیسی خارجی، میدان مغناطیسی مخالف نشان می‌دهند و دفع می‌شوند) تقسیم می‌شوند. خواص و ویژگی‌های نانوذرات مغناطیسی به‌طور معمول وابسته به تکنیک ساخت و ترکیب شیمیایی آن‌هاست. در بسیاری از موارد، نانوذرات در اندازه ۱ تا ۱۰۰ نانومتر خاصیت سوپرپارامغناطیس را نشان می‌دهند که در آن، تحت اثر میدان مغناطیس خارجی، نانوذره از خود یک میدان مغناطیسی القایی هم‌جهت با شدت قوی نشان می‌دهد (شکل ۲-۱۲) [۴۴].

نانوذرات سوپرپارامغناطیس کاربردهای زیادی در تصویرسازی‌های رنگی، سم‌زدایی از سیال‌های زیستی، انتقال کنترل‌شده داروهای ضدسرطان، تصویربرداری تشدید

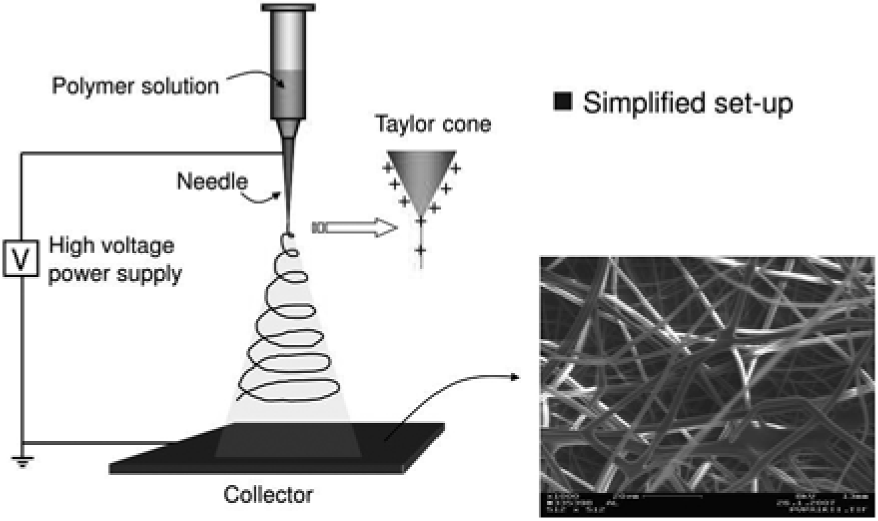


شکل ۲-۱۳: مقایسه ترازهای انرژی نیمه‌هادی در توده و نقطه کوانتومی به همراه الکترون-حفره‌ها (اکسیتون) [۴۶].

مغناطیسی (MRI)، زیست‌حسگرهای مغناطیسی، جداسازی‌های سلولی، گرمادرمانی و رهیابی مولکول‌ها و سلول‌ها دارند [۴۴].

۹.۱. نقاط کوانتومی

نقاط کوانتومی[1]، بلورهای نیمه‌هادی در ابعاد نانو می‌باشند. در پزشکی نیز از نقاط کوانتومی برای طراحی و ساخت نانوزیست‌حسگرها یا به‌عنوان رنگ‌دانه‌هایی با پایداری نوری بالاتر نسبت به رنگ‌ریزه‌های مرسوم استفاده می‌شود. نیمه‌هادی‌ها موادی هستند که هدایت الکتریکی آن‌ها حد واسط هدایت الکتریکی مواد رسانا و نارسانا باشد. رسانایی الکتریکی این مواد را می‌توان با محرک‌های خارجی مانند میدان الکتریکی یا تابش نور تغییر داد. نیمه‌هادی‌ها به دلیل داشتن سطوح انرژی الکترونی در محدوده ۱ تا ۵ ولت، می‌توانند به‌عنوان مواد حساس به نور عمل کنند. در نیمه‌هادی‌ها در حالت توده‌ای (بالک) جذب نور موجب تحریک الکترون از باند ظرفیت و انتقال به باند رسانش می‌شود. جای خالی الکترون، حفره نامیده می‌شود.



شکل ۲-۱۴: نمای شماتیک از فرایند الکتروریسی و قسمت‌های اصلی دستگاه الکتروریسی [۵۰].

1 Quantum Dot

درواقع الکترون و حفره تحت اثر نیروی الکترواستاتیک به هم مقید می‌شوند و به این حالت اکسیتون[1] گفته می‌شود. در هنگام بازگشت الکترون به حفره، انرژی اکسیتون به‌صورت نور تابش می‌شود. به این فرایند فلورسانس نیز گفته می‌شود. انرژی لازم برای تشکیل اکسیتون و تخریب آن که به‌صورت فوتون‌های تحریکی و نشری وجود دارد، توسط ترازهایی از انرژی به‌عنوان بالاترین تراز انرژی پرشده و پایین‌ترین تراز انرژی خالی تعیین می‌شوند و درواقع نوعی احتباس کوانتومی[2] برای اکسیتون ایجاد می‌شود. این احتباس کوانتومی وابسته به اندازه نانوذره است؛ بنابراین نقاط کوانتومی با اندازه‌های متفاوت دارای طول‌موج‌های جذبی و نشری متفاوتی هستند و از یک ماده با اندازه‌های متفاوت می‌توان طول‌موج‌های نشری متفاوتی گرفت (شکل ۲-۱۳).

۱۰.۱. نانوالیاف

به‌طور معمول به فیبرهایی که قطر سطح مقطع آن‌ها کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد، نانوفیبر گفته می‌شود. ویژگی‌هایی نظیر سطح بالا و توانایی مهندسی‌شدن به فرم‌های مختلف، امکان استفاده از نانوالیاف را در کاربردهای مختلف فراهم می‌کند [۴۷]. ازجمله این کاربردها می‌توان به فیلترها، کامپوزیت‌ها، غشاهای چندکاره، داربست‌های مهندسی بافت، پوشش‌های زخم، انتقال دارو، اندام‌های مصنوعی و گرافت‌های عروقی[3] اشاره کرد [۴۸].

نانوالیاف می‌توانند از مواد معدنی (نانوالیافی کربنی) یا از پلیمرهای سنتزی یا طبیعی به روش‌های مختلفی ازجمله پلیمریزاسیون بین‌سطحی[4]، ریسندگی الکترواستاتیک[5] و روش‌های دیگر تولید شوند. رایج‌ترین روش برای تولید نانوالیافی پلیمری الکتروریسی[6] است [۴۹].

همانگونه که شکل ۲-۱۴ نشان می‌دهد، دستگاه الکتروریسی از سه قسمت اصلی تشکیل شده است که عبارت‌اند از: یک سیستم تأمین‌کننده اختلاف پتانسیل بالا

---

1 Exciton
2 quantum confinement
۳ گرافت یک رگ مصنوعی است که به علت نداشتن رگ مناسب به جای فیستول جهت دیالیز توسط جراح گذاشته می‌شود.همچنین ممکن است از گرافت برای ترمیم عروق در نارسایی عروقی بیماران دیابتی استفاده شود.
4 Interfacial polymerization
5 Electrostatic spinning
6 Electrospining