

مواد پیرامون ما

مقدمه:

مادای که در دست گرفته‌اید، لباسی که پوشیده‌اید، یا هر آنچه از بدو تولد با آن سروکار داشته‌اید و حتی مواد سازنده بدن انسان، همه ماده^۱ هستند. در واقع ما در دنیایی متولد می‌شویم و رشد می‌کنیم که مادی است! از این رو یکی از راه‌های اساسی شناخت دنیای پیرامون ما، شناخت صحیح مواد است.

❖ تقسیم‌بندی مواد از نظر حالت

مواد در شرایط طبیعی معمولاً در سه حالت گاز^۲، مایع^۳ و جامد^۴ هستند، که با ویژگی‌های آنها آشنا هستید. در صورت بروز شرایط خاص، ماده وارد حالت چهارم که پلاسما^۵ نام دارد می‌شود.

پلاسما شباهت بسیاری به حالت گازی ماده دارد؛ زیرا نیروی مؤثر چندانی بین ذرات تشکیل‌دهنده پلاسما که توانایی کنار هم نگه داشتن آنها را داشته باشد وجود ندارد. با این وجود، تفاوت اصلی میان این دو حالت ماده، در یونیزه بودن ذرات تشکیل‌دهنده پلاسما است. بنابراین، پلاسما از مجموعه‌ای ذرات باردار الکتریکی (با بارهای غیرهم‌نام) تشکیل شده است که آزادانه در محیط پیرامونی خود حرکت می‌کنند. از این رو می‌توان یک گاز را با استفاده از روش‌هایی که بتواند ذرات تشکیل‌دهنده آن را یونیزه کند، تبدیل به پلاسما کرد؛ حرارت دادن گاز یا قرار دادن آن در معرض میدان قوی الکتریکی از روش‌هایی هستند که یک گاز خنثی را تبدیل به پلاسما می‌کند.

❖ برهمکنش‌های بین ذرات ماده

برهمکنش‌های بین‌ذره‌ای به دو دسته درون مولکولی و بین مولکولی تقسیم می‌شوند. در هر مولکول، اتم‌ها توسط نیروهای درون مولکولی کنار هم نگه داشته شده‌اند. این برهمکنش‌های درون مولکولی ناشی از نیروهایی است که باعث ایجاد پیوند شیمیایی میان اتم‌ها و در نتیجه تشکیل مولکول‌ها می‌شوند. پیوند یونی میان ذرات تشکیل‌دهنده نمک خوراکی (NaCl)، پیوند اشتراکی (کووالانسی) میان اتم‌های اکسیژن و کربن در مولکول کربن دی‌اکسید (CO₂) و یا پیوند فلزی میان اتم‌های آهن در یک توده آهن نمونه‌هایی از برهمکنش‌های درون مولکولی است.

مولکول‌ها در مایعات و جامدات با نیروهای بین مولکولی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. این نیروها به صورت نیروهای جاذبه یا دافعه بین مولکول‌های نزدیک هم ایجاد می‌شوند و نسبت به نیروهای درون مولکولی ضعیف‌تر هستند؛ برای مثال پیوند اشتراکی که درون مولکول آب، بین اتم‌های تشکیل‌دهنده آن وجود دارد بسیار قوی‌تر از نیروی جاذبه (پیوند هیدروژنی) بین مولکول آب و سایر مولکول‌های مجاورش است. انواع برهم‌کنش‌های واندروالسی از جمله پیوندهای هیدروژنی، در اثر برهم‌کنش دوقطبی‌های لحظه‌ای و یا دائمی بین مولکول‌ها تشکیل می‌شود. نیروهای بین

¹ Matter

² Gas

³ Liquid

⁴ Solid

⁵ Plasma

مولکولی به دلیل اینکه ماهیت الکتریکی دارند، بسیار کوتاه برد هستند؛ با این وجود این نیروها در مقیاس‌های بزرگ یعنی هنگامی که تعداد بسیار زیادی از ذرات با هم برهم‌کنش دارند، بسیار تأثیرگذار بوده و تعیین‌کننده بسیاری از خواص ماده هستند.

❖ مواد بلورین و مواد بی‌شکل

مواد جامد را می‌توان به دو گروه کلی بی‌شکل^۱ و بلورین^۲ تقسیم‌بندی کرد. در مواد بی‌شکل چیدمان اتم‌ها یا مولکول‌های سازنده از هیچ نظم خاصی پیروی نمی‌کند. در حالی که مواد بلورین از کنار هم قرار گرفتن اتم‌ها یا مولکول‌ها به صورت منظم شکل می‌گیرند. نظم موجود در این مواد دارای دو شرط اصلی است؛ دوره‌ای^۳ (تکرارشونده) و بلند برد است که با گسترش در هر سه جهت فضایی، ساختاری تعریف‌شده ایجاد می‌کند که به آن بلور^۴ می‌گویند. در هر بلور کوچک‌ترین واحد متشکل از اتم‌ها یا مولکول‌های سازنده که نظم ساختاری بلور را در خود دارد و به‌عنوان الگویی تکرارشونده است، سلول واحد^۵ گفته می‌شود. بر اساس این تعریف، یک ماده جامد بلورین با تکرار سلول واحد آن در سه بعد شکل می‌گیرد؛ در نتیجه فضا از تکرار سلول‌های واحد پر شده و شبکه بلورین^۶ را پدید می‌آورد.

شاخه‌ای از علم مواد که به مطالعه ساختار بلوری مواد می‌پردازد، بلورشناسی^۷ نامیده می‌شود. بنابر مطالعات بلورشناسی تمامی مواد بلورین بر اساس تنوع شکل هندسی سلول واحد، فقط در هفت نوع دستگاه بلوری طبقه‌بندی می‌شوند، این هفت دستگاه عبارتند از: مکعبی^۸، چهارگوشه^۹، شش گوشه^{۱۰}، راست لوزی^{۱۱}، لوزی پهن^{۱۲}، تک شیب^{۱۳} و سه شیب^{۱۴}. با جایگذاری اتم‌ها در این هفت دستگاه، چهارده شبکه بلوری حاصل می‌شود. این شبکه‌های بلوری چهارده‌گانه به افتخار کشف علمی براوه در سال ۱۸۴۸ میلادی به شبکه‌های براوه^{۱۵} معروف‌اند (شکل ۱). قرارگیری انواع اتم‌ها یا مولکول‌ها در این شبکه‌های بلوری، بلورهای متنوعی با خواص متمایزی را ایجاد می‌کند.

پاشگاه نانو

¹ Amorphous

² Crystalline

³ Periodic

⁴ Crystal

⁵ Unit cell

⁶ Crystal lattice

⁷ Crystallography

⁸ Cubic

⁹ Tetragonal

¹⁰ Hexagonal

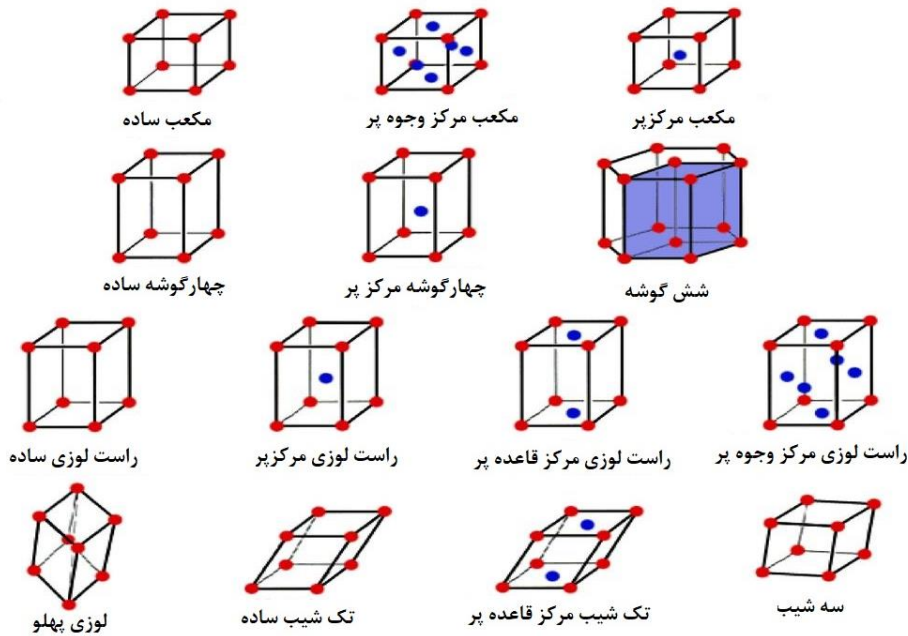
¹¹ Orthorombic

¹² Rombohedral

¹³ Monoclinic

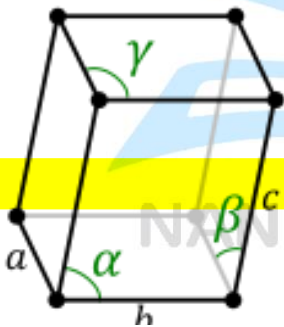
¹⁴ Triclinic

¹⁵ Bravais lattice



شکل ۱: تصویر ۱۴ شبکه براوه در ۷ دستگاه بلوری.

مشخصه‌های شبکه بلور



شکل ۲: نحوه نشان دادن یک شبکه بلوری و شش متغیر آن.

هر سلول واحد با شش عدد مشخصه توصیف می‌شود؛ این اعداد شش گانه با نام ثابت‌های شبکه^۱ به اعداد مشخصه یک سلول واحد معروفند که در دو گروه جای می‌گیرند. گروه اول مربوط به طول اضلاع اصلی سلول واحد است و گروه دوم زاویه بین این ضلع‌ها را نشان می‌دهد؛ در شکل ۲ اندازه سه ضلع سازنده (a و b و c) و زاویه بین هر دو ضلع سازنده (α و β و γ) نمایش داده شده است. برای مثال در شبکه براوه مکعبی، اندازه ضلع‌ها باهم برابرند و زاویه بین آنها ۹۰ درجه است. در شبکه سه شیب هیچ کدام از سه ضلع اندازه برابر ندارند و زاویه بین هر دو ضلع نیز با زاویه‌های دیگر متفاوت است ($a \neq b \neq c$ و $\alpha \neq \beta \neq \gamma$).

برای بیان مشخصه‌های فضایی یک سلول واحد، علاوه بر ثابت‌های شبکه، سه مشخصه مهم

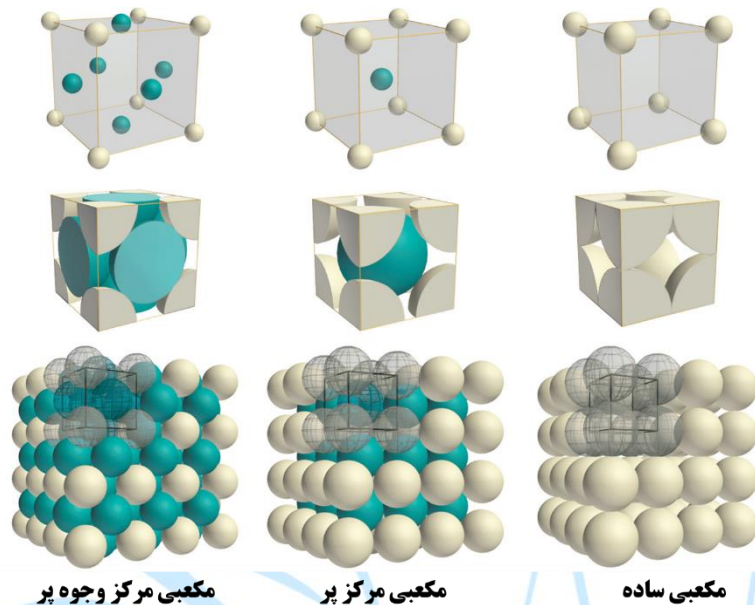
دیگر نیز وجود دارد که عبارتند از: تعداد اتم‌های موجود در یک سلول واحد، تعداد همسایگان یک اتم در یک سلول واحد (عدد همسایگی^۲) و جزئی از حجم سلول واحد که توسط اتم‌ها اشغال شده است (ضریب فشردگی^۳ اتمی).

در ساختار مکعبی ساده، هر اتم با ۶ اتم دیگر همسایه است، سه اتم در سه گوشه مجاور در همان سلول واحد و سه اتم در سلول‌های دیگر. این نشان می‌دهد عدد همسایگی این ساختار برابر شش است.

¹ Lattice constants
² Coordination Number (CN)
³ Atomic Packing Factor (APF)

ضریب فشردگی^۱ اتمی میزان پر شدن فضای شبکه توسط اتم‌ها را نشان می‌دهد و از نسبت حجم اتم‌های داخل سلول واحد بر حجم کل سلول واحد به دست می‌آید (رابطه^۱).

$$(۱) \quad \text{ضریب فشردگی اتمی} = \frac{\text{مجموع حجم اتم‌های داخل سلول واحد}}{\text{حجم کل سلول واحد}}$$



شکل ۳: تصویری از سه نوع ساختار بلوری مکعبی متداول.

در ادامه این مشخصه‌ها را در ساده‌ترین سلول واحد (مکعبی ساده) بررسی می‌کنیم. ساختار سلول واحد مکعبی ساده را در شکل ۳ در نظر بگیرید. ۸ اتم در ۸ گوشه مکعب قرار دارند ولی به صورت کامل داخل سلول واحد مکعبی نیستند. اگر یکی از این ۸ اتم را در نظر بگیریم، متوجه می‌شویم که این اتم بین سلول واحد نشان داده شده و ۷ سلول واحد دیگر که در آن گوشه با هم همسایه هستند، مشترک است. پس می‌توان گفت فقط $\frac{1}{8}$ آن اتم متعلق به سلول واحد نشان داده شده است؛ در نتیجه تعداد اتم‌های سازنده یک واحد شبکه مکعبی ساده برابر $8 \times \frac{1}{8} = 1$ است. از سوی دیگر هر اتم در این ساختار، با ۶ اتم دیگر همسایه است، سه اتم در سه گوشه مجاور در همان سلول واحد و سه اتم در سلول‌های دیگر؛ از این رو عدد همسایگی این ساختار برابر شش است. همان‌طور که در شکل برای ساختار مکعبی قابل مشاهده است، اتم‌های مجاور در این ساختار، روی اضلاع مکعب بر هم مماسند. با فرض آن که در این رابطه R شعاع کره اتم باشد (با تقریب خوبی شکل اتم را کره کامل فرض کردیم)، اندازه ضلع مکعب سلول واحد دو برابر اندازه شعاع هر اتم است ($a = 2R$)؛ پس طبق رابطه ۱، ضریب فشردگی 0.52 محاسبه می‌شود:

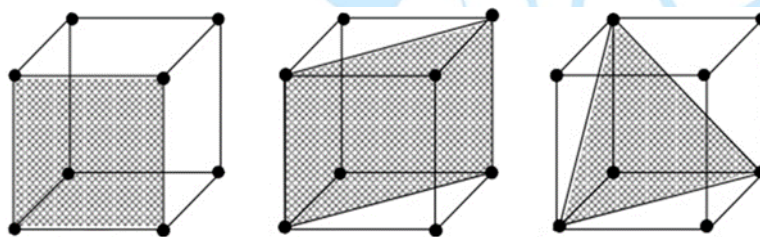
$$(۲) \quad \text{ضریب فشردگی ساختار ساده مکعبی} = \frac{1 \times \frac{4}{3} \pi R^3}{(2R)^3} = 0.52$$

¹ Packing factor

با همین روش می توان ضریب فشردگی را برای سه ساختار بلوری مهم دیگر یعنی مکعبی مرکز پر، مکعبی مرکز وجوه پر و شش گوشه فشرده محاسبه نمود. ضریب فشردگی در سلول واحد مکعبی مرکز پر $0/68$ ، مرکز وجوه پر $0/74$ و ضریب فشردگی سلول واحد هگزاگونال فشرده $0/74$ محاسبه می شود، برای اطلاع از جزئیات این محاسبه می توانید به کتاب مراجعه نمایید.

صفحه های بلوری

صفحه های بلوری^۱، صفحه هایی مجازی هستند که حداقل از سه نقطه غیر هم راستا در شبکه براوه عبور می کنند و محل تقاطع آنها با نقاط در شبکه بلور، نظم تعریف شده و تکرارپذیری را به وجود می آورد. در علم بلورشناسی با هدف توصیف بهتر اجزای یک شبکه بلوری، این صفحات مفروض شده اند. در شکل ۴ سه صفحه از میان انواع صفحه های بلوری ممکن برای ساختار بلوری مکعبی ساده نشان داده شده است.



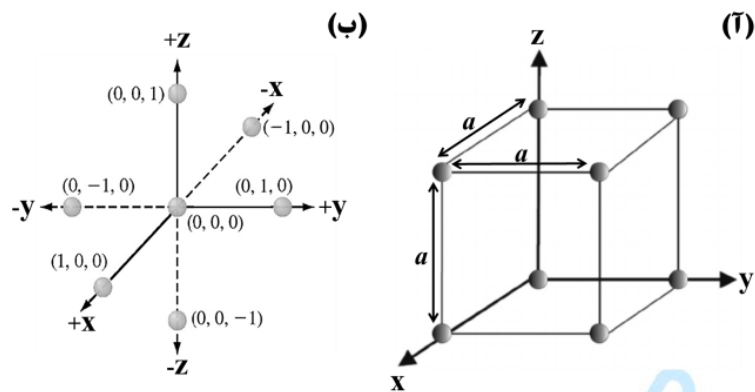
شکل ۴: سه صفحه بلوری از میان انواع صفحه های بلوری برای ساختار بلوری مکعبی ساده.

همه صفحه های بلوری مشابه را می توان با گروهی از اعداد صحیح که موسوم به شاخص های میلر^۲ هستند، توصیف کرد. به طور معمول هر دسته مشخص از صفحه های بلوری (صفحه های موازی که هم ارز هستند) را با استفاده از سه عدد صحیح h ، k و l نشان می دهند که به شکل (hkl) نوشته می شود. شاخص میلر در واقع نام و نشان یک صفحه بلوری است و در مباحث بلورشناسی هر صفحه ای با شاخص میلر آن معرفی می شود. ساده ترین راه برای به دست آوردن شاخص های میلر برای صفحه های بلوری، تعیین محل برخورد این صفحه ها با محورهای دستگاه مختصاتی است که سلول واحد شبکه بلوری مورد مطالعه بر آن منطبق است. در چنین دستگاه مختصاتی که در اصطلاح دستگاه مختصات بلورشناسی^۳ نامیده می شود، سه بردار یکه a_1 ، a_2 و a_3 به ترتیب در راستای محورهای x ، y و z تعریف می شوند که طول آنها برابر طول ثابت شبکه هم راستای آنها بوده و زاویه میان این بردارها نیز برابر زاویه شخصی سلول واحد است. شکل ۵ تصویری از دستگاه مختصات بلورشناسی برای شبکه بلوری مکعبی ساده و مختصات محل قرارگیری اتم های یک بلور شبکه مکعبی ساده در این دستگاه را نشان می دهد.

¹ Lattice plane

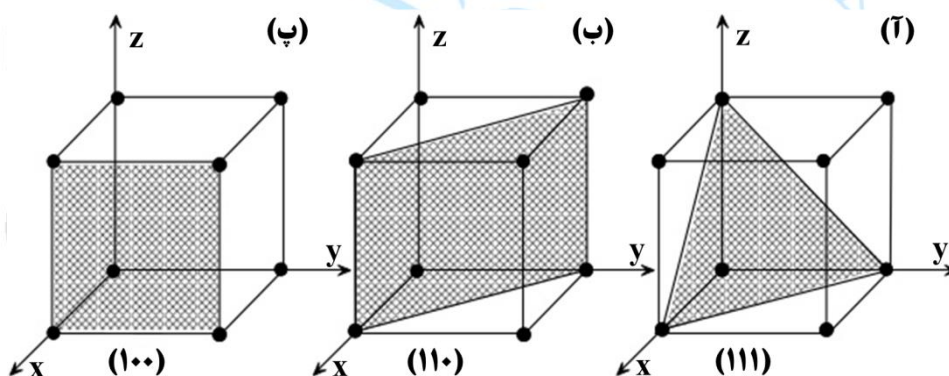
² Miller indices

³ Crystallographic systems



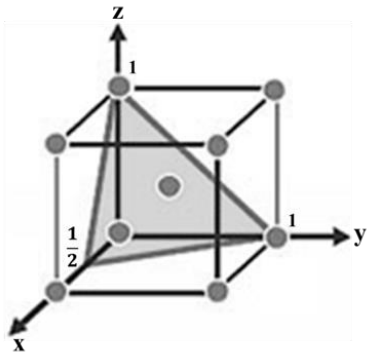
شکل ۵: (آ) شبکه بلوری مکعبی ساده با ثابت شبکه a در دستگاه مختصات بلورشناسی و (ب) مختصات محل قرارگیری اتم‌های یک بلور شبکه مکعبی ساده در این دستگاه.

شاخص‌های میلر یک صفحه بلوری برابر معکوس محل قطع محورهای دستگاه مختصات بلورشناسی توسط آن صفحه است. به این ترتیب که معکوس طول در محل قطع محور X برابر h ، معکوس عرض در محل قطع محور Y برابر k و معکوس ارتفاع در محل قطع محور Z برابر l می‌باشد. در صورتی که یک صفحه موازی یک محور باشد، محل قطع برابر بی‌نهایت فرض شده و معکوس بی‌نهایت، صفر است. شکل آ- برای مثال صفحه‌ای را نشان می‌دهد که هر سه محور دستگاه مختصات بلورشناسی را در محل قرارگیری اتم‌های شبکه مکعبی ساده قطع می‌کند؛ مختصات محل را می‌توان به راحتی و با کمک گرفتن از شکل ۵-ب تعیین کرد. طول، عرض و ارتفاع محل قطع محورهای مختصات برابر یک است؛ در نتیجه شاخص میلر این صفحه برابر (111) به دست می‌آید. شکل ۶-ب صفحه‌ای را نشان می‌دهد که طول و عرض محل قطع محورهای مختصات آن برابر یک است، در حالی که این صفحه موازی محور Z بوده و در هیچ نقطه‌ای این محور را قطع نمی‌کند؛ از این رو شاخص میلر این صفحه برابر (110) است. به همین ترتیب شاخص میلر صفحه مشخص شده در شکل ۶-پ (100) می‌باشد. لازم به ذکر است که در یک دستگاه مختصات بلورشناسی، تمامی صفحه‌های موازی هم‌ارز بوده و با یک شاخص میلر مشخص می‌شوند.



شکل ۶: سه صفحه بلوری (111) ، (110) و (100) در یک بلور مکعبی ساده.

ممکن است محل قطع محور مختصات توسط صفحه بلوری در نیمه منفی آن رخ دهد، در چنین حالتی مؤلفه مربوط به این عدد منفی با گذاشتن یک خط تیره بر روی معکوس آن بیان می‌شود؛ به عنوان مثال اگر صفحه‌ای دو محور



شکل ۷: نمایش یک صفحه بلوری با شاخص میلر (۲۱۱) در شبکه بلوری

افقی و عمودی (X و Z) را در یک و محور عرضی (Y) را در منفی یک قطع کند، شاخص میلر آن برابر (111) خواهد بود. در مواردی که محل قطع یک صفحه کمتر از یک (عددی کسری) باشد، در شاخص میلر چنین صفحه‌ای اعدادی بزرگ‌تر از یک وجود خواهند داشت؛ برای مثال صفحه‌ای که شاخص میلر آن (۲۱۱) است، محور X را در نقطه ۰/۵ و محور Y و Z را در نقطه ۱ قطع می‌کند؛ این شاخص می‌تواند در شبکه بلوری مکعبی مرکزپر، منسوب به صفحه‌ای باشد که دربردارنده دو اتم مستقر بر روی محورهای Y و Z و اتم موجود در مرکز سلول واحد است (شکل ۷).

❖ تقسیم‌بندی مواد از نظر اندازه

کشف تغییرات قابل توجهی که در خواص مواد در ابعاد نانو رخ می‌دهد، سبب شده است که در سال‌های اخیر مواد جامد را در دو گروه اصلی توده‌ای^۱ و نانویی^۲ نیز تقسیم‌بندی کنند.

بر این اساس، نانوماده به ماده‌ای گفته می‌شود که حداقل یکی از ابعاد آن (طول، عرض و ارتفاع) در ابعاد نانو باشد، به این معنی که ابعاد آن در محدوده ۱۰۰ - ۱ nm باشد و یا از اجزای مؤثری با این اندازه تشکیل شده باشد. لازم به ذکر است همه اتم‌ها و بسیاری از مولکول‌های معمولی با وجود آن که اندازه‌ای بسیار کوچک دارند (کمتر از ۱ nm)، در دسته نانومواد قرار نمی‌گیرند.

❖ علم و فناوری نانو

پس از معرفی نانومواد، اکنون زمان آن رسیده تا تعریف دقیق علم نانو^۳ ارائه شده و مفهوم فناوری نانو^۴ بیان شود. رایج‌ترین تعریف علم نانو به این صورت بیان می‌شود:

علم نانو به مطالعه پدیده‌ها در ابعاد نانو می‌پردازد؛ از سویی سعی در کشف خواص مواد در این ابعاد دارد و از سوی دیگر به دنبال توجیه و درک این خواص نوظهور با خلق نظریات جدید و بهره‌گیری از نظریات موجود می‌باشد. دانشمندان علم نانو همواره با تبیین اصول حاکم بر حوزه نانو بهره‌برداری از خواص نانومواد را برای مهندسان نانو ممکن می‌سازند.

¹ Bulk

² Nanomaterial

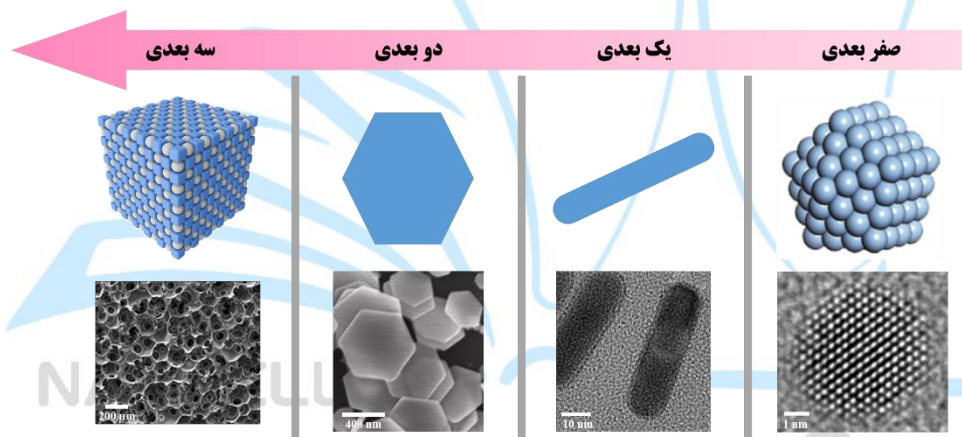
³ Nanoscience

⁴ Nanotechnology

❖ تقسیم‌بندی نانومواد بر اساس ابعاد

تمامی مواد و اجسام در پیرامون ما سه بعد طول، عرض و ارتفاع دارند. در نانومواد حداقل یکی از این ابعاد سه‌گانه در محدوده نانو قرار دارد. از این رو دسته‌بندی نانومواد بر اساس تعداد ابعاد نانویی آنها انجام می‌شود؛ نانوموادى که هر سه بعد آنها در محدوده نانو کمتر باشد، نانومواد صفر بعدی؛ نانوموادى که دو بعد آنها در محدوده نانو باشد، نانومواد یک بعدی و آنهایی که تنها یک بعد در محدوده نانو دارند، نانومواد دو بعدی نامیده می‌شوند. در واقع در این تقسیم‌بندی از ابعاد نانویی در مقابل ابعاد دیگر صرف نظر می‌شود.

در دسته‌بندی نانومواد گروه دیگری از نانومواد به نام نانومواد سه بعدی نیز وجود دارند. این نانومواد هیچ بعدی در محدوده نانو ندارند و در تمامی ابعاد سه‌گانه دارای ابعادی به مراتب بزرگ‌تر از محدوده نانومواد هستند. آنچه مواد توده‌ای را تبدیل به نانوماده سه بعدی می‌کند وجود اجزای سازنده نانویی است که به صورت مستقیم در خواص آنها ماده‌دخیل هستند؛ به عنوان مثال ماده مرکبی^۱ که جزء تقویت‌کننده آن یک نانوماده یک بعدی یا صفر بعدی باشد، خود یک نانوماده سه بعدی است و یا پارچه‌ای که به الیاف آن نانوذرات ضد باکتری افزوده شده است، نیز نانومواد سه بعدی به شمار می‌آید. علاوه بر اجزای نانویی، وجود خلل و فرج نانویی نیز ماده توده‌ای را به نانوماده سه بعدی تبدیل می‌کند. شکل طراحی بسیار ساده از این ۴ گروه از نانومواد را نشان می‌دهد.



شکل ۸: دسته‌بندی چهارگانه نانومواد بر اساس ابعاد هندسی آنها.

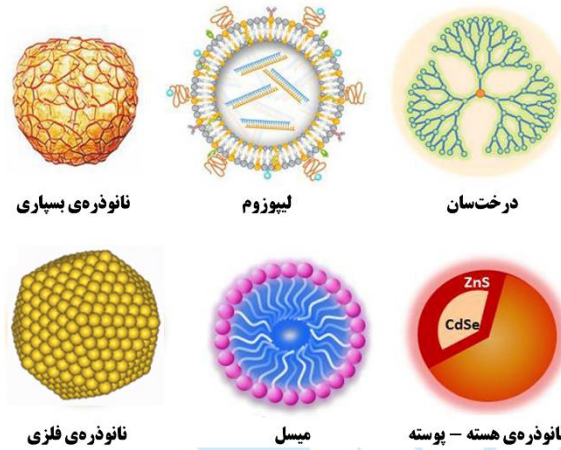
نانومواد صفر بعدی

نانومواد صفر بعدی، معروف‌ترین نانوساختارهای مورد استفاده هستند که معمولاً با نام نانوذرات شناخته می‌شوند. اندازه نانوذرات در هر سه بعد کوچک‌تر از 100 nm است. این نانومواد هم به صورت بی‌شکل و هم به صورت بلورین و در انواع شکل‌ها از جمله کروی، مکعبی، هرمی، پوسته کروی، هسته-پوسته^۲ و غیره وجود دارند. شکل نانوذرات تابع روش تولید و شرایط محیطی تهیه آنها است و روی خواص و حوزه کاربردی‌شان تأثیر دارد.

شکل ۹ طراحی از چند نوع نانوماده صفر بعدی را نشان می‌دهد.

¹ Composite

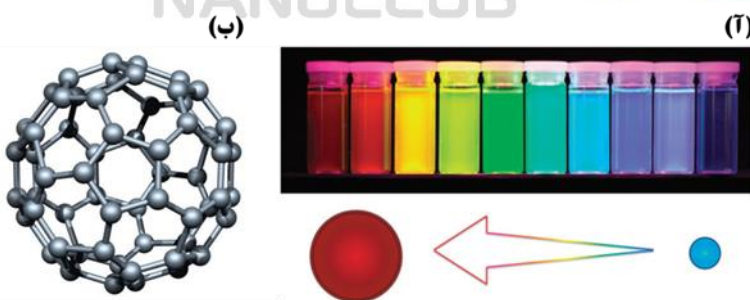
² Core-shell



شکل ۹: طرحی از چند نمونه از نانومواد صفربعدی؛

نقاط کوانتومی^۱ از مهم‌ترین نانومواد صفربعدی هستند که ساختار بلوری داشته و نیمه‌رسانا می‌باشند. نقاط کوانتومی در دمای محیط معمولاً اندازه‌ای در حدود 10 nm دارند انواع ترکیب‌های نیمه‌رسانا مانند CdTe ، CdSe و ZnSe از جمله مواد مورد استفاده برای تولید نقاط کوانتومی هستند. ویژگی‌های نوری منحصر به فرد این نانومواد صفربعدی موجب کاربرد فراوان آنها در حوزه‌هایی مانند الکترونیک، اپتیک و پزشکی شده است. از آنجا که هر نقطه کوانتومی وابسته به اندازه خود طیف انرژی^۲ مجزایی دارد، بعد از قرار گرفتن در معرض تابش نور، تنها می‌تواند یک طول موج مشخص تک‌رنگ را منتشر کند (شکل ۱۰-آ). اندازه از این رو انتشار رنگ‌های مختلف از نقاط کوانتومی در اندازه‌های مختلف و در شرایط یکسان تابش نور، حیرت آور است. دلیل این رفتار در بخش بعدی به‌طور کامل بررسی خواهد شد.

فولرن‌ها^۳ از جذاب‌ترین نانومواد صفربعدی هستند که ساختاری شبیه به یک توپ توخالی دارند (به همین دلیل به آنها Buckyball هم گفته می‌شود). اتم‌های کربن در ساختار فولرن‌ها با پیوندهای اشتراکی در پنج‌ضلعی‌ها و



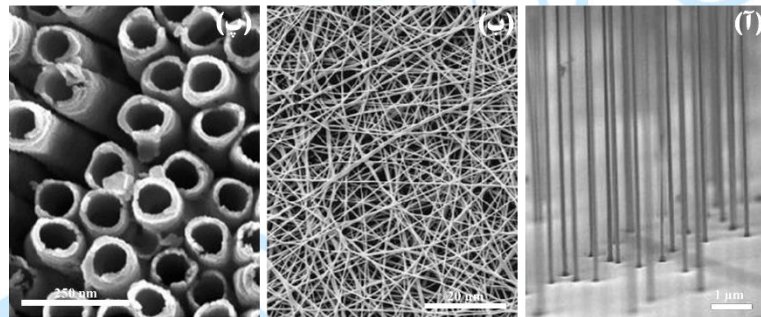
شکل ۱۰: (آ) تغییر رنگ نشر شده توسط نقاط کوانتومی با تغییر اندازه آنها و (ب) طرحی از ساختار یک فولرن C_{60} .

شش‌ضلعی‌هایی به هم وصل شده‌اند و ساختاری قفس مانند را تشکیل داده‌اند. معروف‌ترین فولرن شناخته شده، فولرن C_{60} است که دارای ۲۰ شش‌ضلعی و ۱۲ پنج‌ضلعی است. فولرن C_{60} خواص زیستی جالبی داشته و کاربرد آن در فرآیندهای درمانی و پزشکی که از فناوری نانو و مواد نانو ساختار استفاده می‌شود در حال گسترش است

¹ Quantum Dot
² Energy Spectrum
³ Fullerene

نانومواد یک‌بعدی

نانومواد یک‌بعدی، نانوساختارهایی هستند که دو بعد آنها حتماً در محدوده نانو قرار دارد و طول بعد دیگر حداقل چندین برابر دو بعد نانومتری است. نانومواد یک‌بعدی با توجه به شکل ظاهری و نسبت طول به سطح مقطع آنها، در چهار گروه اصلی نانوالیاف^۱، نانوسیم‌ها^۲، نانومیله‌ها^۳ و نانولوله‌ها^۴ دسته‌بندی می‌شوند. به نسبت طول بعد بزرگ‌تر به طول بعد کوچک‌تر اصطلاحاً نسبت ابعادی یا نسبت منظر^۵ گفته می‌شود. نانوسیم یا نانولیف، نانوماده‌ای است که نسبت ابعادی آن بسیار بزرگ (عددی در بازه ۱۰۰ الی ۱۰۰۰) است. اگر نسبت ابعادی در محدود ۱۰ الی ۱۰۰ باشد، به آن نانوماده یک‌بعدی، نانومیله گفته می‌شود و همان‌طور که از نام نانولوله‌ها برداشت می‌شود، نانولوله‌ها نانومواد یک‌بعدی توخالی هستند (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از (آ) نانوسیم‌های سیلیکون [۵] (ب) نانوالیاف پلی‌اتیلن اکسید [۶] و (پ) نانولوله‌های تیتانیوم دی‌اکسید.

خواص منحصر به فردی همچون رسانایی الکتریکی و خواص نوری، مغناطیسی، حسگری و زیستی، سبب شده که نانومواد یک‌بعدی کاربردهای بسیاری در تمامی صنایع از جمله در صنعت الکترونیک پیدا کنند. یکی از جالب‌ترین ویژگی نانومواد یک‌بعدی، رفتار الکترونیکی آنها و تغییرات هدایت الکتریکی آنها است. یک‌بعدی بودن این نانوساختارها موجب می‌شود که حرکت الکترون‌ها صرفاً در راستای محور آنها ممکن باشد. برای نانولوله‌های کربنی^۶ که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نانوساختارهای یک‌بعدی به شمار می‌روند، حرکت محوری الکترون‌ها شکل خاصی به خود می‌گیرد که به آن ترابرد بالستیک الکترون^۷ گفته می‌شود. به این معنی که الکترون‌ها می‌توانند بدون ممانعت فضایی در راستای محور نانولوله حرکت کنند. این امر موجب می‌شود نانولوله‌های رسانا توانایی رسانش جریان الکتریکی در حدود ۱۰۰۰ برابر بیشتر از فلز مس را داشته باشند.

¹ Nanofiber

² Nanowire

³ Nanorod

⁴ Nanotube

⁵ Aspect ratio

⁶ Carbon nanotube (CNT)

⁷ Ballistic electron transport

با این حال برخی مشاهدات تجربی و نیز مفاهیم فیزیکی حاکی از آن است که رسانش الکتریکی نانوسیم‌های فلزی از حالت توده‌ای آنها کمتر است؛ زیرا هنگامی که قطر سیم کمتر از طول پویش آزاد الکترون‌ها^۱ است، الکترون‌ها در مرزهای پیرامونی نانوسیم‌ها پراکنده می‌شوند. در این شرایط کاهش قطر نانوسیم موجب کاهش طول پویش آزاد الکترون شده و کاهش رسانایی سیم را در پی خواهد داشت. دومین عاملی که خواص الکتریکی نانوسیم‌ها را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد، پدیده‌ای موسوم به اثر لبه^۲ است. این پدیده از اتم‌هایی که در سطح نانوسیم‌ها حضور دارند نشأت می‌گیرد؛ این اتم‌های سطحی به دلیل اینکه به‌طور کامل به اتم‌های مجاور خود متصل نیستند، رفتاری متفاوت از اتم‌های درونی داشته و از آنجایی که عامل بسیاری از عیوب ساختاری در نانوسیم‌ها هستند، موجب کاهش رسانایی نانوسیم‌ها نسبت به حالت توده‌ای آنها می‌شوند. با این حال وجود این اتم‌های سطحی برای نانوسیم‌ها یک مزیت به شمار می‌رود و کاربرد ارزشمند استفاده به‌عنوان نانوحسگر را برای نانوسیم‌ها در پی دارد. به این ترتیب که با جذب اولین اتم یا مولکول بر روی سطح یک نانوسیم، رسانایی الکتریکی آن تغییر بسیار محسوسی می‌کند که با آشکارسازی آن، می‌توان به وجود گونه جدید در محیط پی برد.

یکی دیگر از ویژگی‌های مهم نانوسیم‌ها این است که در صورت کاهش ابعاد سطح مقطع نانوسیم نیمه‌رسانا به مقادیری کمتر از ۲۰ نانومتر، این نانوسیم اثرات کوانتومی از خود نشان می‌دهد؛ از این رو به آن، سیم کوانتومی^۳ گفته می‌شود. رسانایی الکتریکی سیم‌های کوانتومی کوانتیزه است؛ به این ترتیب که الکترون‌هایی که از نانوسیم عبور می‌کنند صرفاً دارای مقادیر گسسته‌ای از انرژی می‌باشند.

از دیگر نانوساختارهای یک‌بعدی پرکاربرد می‌توان به نانوالیاف اشاره کرد. الیاف به مواد جامدی گفته می‌شود که در عین انعطاف‌پذیری و ظرافت بالا، طول بسیار بلندتری نسبت به قطرشان (بیش از ۱۰۰۰ برابر) دارند. حال اگر قطر این الیاف محدود به ابعاد نانومتری شود، این مواد نانوالیاف نامیده می‌شوند. امروزه نانوالیاف در بسیاری از حوزه‌ها به‌ویژه در صنایع دارویی، مهندسی بافت، زخم پوشش‌ها، صنایع نساجی، ساخت فیلترها و فرآیندهای جداسازی کاربرد دارند. کشسانی (مقاومت کششی) بالا، نسبت سطح به حجم بسیار بالا و طول بسیار زیاد از ویژگی‌هایی است که نانوالیاف را منحصر به فرد و کاربردی می‌سازد.

نانومواد دوبعدی

نانومواد دوبعدی گروهی دیگر از نانوساختارها هستند که یک بعد از آنها در ابعاد نانو قرار دارد و طول دو بعد دیگر چندین برابر بزرگ‌تر از طول بعد کوچک‌تر است. نانومواد دوبعدی به صورت ذاتی دو نوع مختلف دارند؛ یا به صورت مستقل در قالب نانوصفحه‌ها^۴ یا نانورقه‌ها^۵ هستند یا به صورت لایه نازک^۶ روی زیرلایه‌های^۷ مختلف رشد داده می‌شوند.

^۱ طول پویش آزاد الکترون (electron mean free path) برابر طولی است که الکترون بدون منحرف شدن به حرکت مستقیم خود در یک راستا ادامه دهد.

^۲ Edge effect

^۳ Quantum wire

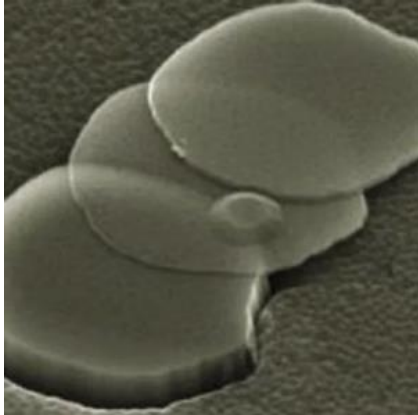
^۴ Nanoplate

^۵ Nanosheet

^۶ thin film

^۷ Substrate

لایه‌های نازک یا نانوپوشش‌ها با ضخامت نانومتری روی سطح یک ماده دیگر به نام زیرلایه قرار می‌گیرند. مهم‌ترین کاربرد نانولایه‌ها، ایجاد ویژگی‌های سطحی موردنیاز مثل آب‌گریزی، مقاومت به خوردگی، مقاومت به سایش و غیره روی زیرلایه است. لایه‌های نازک کاربردهای گسترده‌ای در ساخت ادوات الکترونیکی و تجهیزات نوری دارند؛ همچنین از لایه‌های نازک به‌عنوان پوشش‌هایی با کاربردهای ضدسایش و ضدخوردگی نیز استفاده می‌شود. شبیه به نانوذرات و نانومواد یک‌بعدی، در نانولایه‌ها نیز اگر ضخامت نانولایه نیمه‌رسانا به حدی کم باشد که اثرات کوانتومی مشاهده شود، به آنها لایه‌نازک چاه کوانتومی^۱ گفته می‌شود.



دسته دیگر نانومواد دوبعدی، نانوصفحه‌ها و نانورقه‌ها هستند که مستقل از زیرلایه‌اند. از مهم‌ترین نانوصفحه‌ها می‌توان نانوصفحه‌های گرافن^۲ را نام برد. گرافن یک تک‌لایه از اتم‌های کربن است که گرافیت از روی هم قرار گرفتن تعداد زیادی از این تک‌لایه‌ها تشکیل شده است (شکل ۱۲). گرافن به دلیل خواص منحصر به فردی مانند رسانایی الکتریکی فوق‌العاده زیاد، شفافیت، پایداری شیمیایی و استحکام مکانیکی بالا امروزه توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب کرده است.

شکل ۱۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانولایه‌های گرافیتی با ضخامت نانومتری تهیه شده از طریق لایه‌لایه کردن مغز مداد.

نانومواد سه‌بعدی

مواد سه‌بعدی نانو ساختار یا نانومواد توده‌ای یا حجیم، دسته‌ای از نانومواد هستند که ابعاد ظاهری بزرگ‌تری از محدوده تعریف فناوری نانو دارند. آنچه که باعث می‌شود این گروه از مواد جزء نانومواد دسته‌بندی شوند این است که برخی از اجزای سازنده آنها حداقل یک بعد نانومتری دارند و یا دارای تخلخل نانومتری هستند. نانومواد سه‌بعدی در حالت کلی شامل مواد نانوترکیب^۳، مواد نانومتخلخل^۴ (دارای حفره‌های نانومقیاس) و مواد نانوبلوری^۵ یا نانومواد ریزدانه می‌باشد.

مواد نانوترکیب: مواد مرکب^۶، موادی هستند که از دو یا چند جزء مختلف و قابل تفکیک تشکیل شده‌اند. در مواد مرکب جزء اصلی که بخش اعظم ماده را تشکیل می‌دهد، به زمینه^۷ معروف است؛ جزء دوم که اصطلاحاً با نام تقویت‌کننده^۸ شناخته می‌شود، با هدف تقویت خواص ماده زمینه در آن پراکنده می‌شود. در برخی موارد جزء سومی نیز به زمینه اضافه می‌شود که نقش چندانی در بهبود خواص ندارد و صرفاً برای افزایش حجم و کاهش هزینه تولید نهایی به زمینه افزوده می‌شود، به این جزء پرکن^۹ گفته می‌شود. هدف از افزودن اجزای دیگر به ماده زمینه در مواد مرکب، تغییر یا بهبود خواص ماده زمینه و به دست آوردن ماده‌ای ترکیبی با خواص دلخواه و بهبود یافته است.

¹ Quantum well

² graphene

³ Nanocomposite material

⁴ Nanoporous material

⁵ Nanocrystalline material

⁶ Composite

⁷ Matrix

⁸ Reinforcement

ساده‌ترین و قدیمی‌ترین مادهٔ مرکب ساخته شده به دست بشر کاه‌گل است. حال اگر یکی از اجزای یک مادهٔ مرکب در ابعاد نانو باشد (انواع نانومواد صفر بعدی، یک‌بعدی و دو بعدی)، مادهٔ مرکب حاصل را ماده مرکب نانویی یا در اصطلاح مادهٔ نانوترکیب می‌نامند. به‌طورمعمول در مواد نانوترکیب جزء تقویت‌کننده‌ای که به زمینه اضافه می‌شود، یک مادهٔ نانو ساختار است. بهبود خواص در مواد مرکب نانویی بسیار چشم‌گیرتر از مواد مرکب معمولی است؛ دلیل این امر برهم‌کنش بسیار قوی انواع نانومواد استفاده‌شده به‌عنوان تقویت‌کننده در ساخت مواد نانوترکیب است.

مواد نانومتخلخل: موادی که تخلخل^۱ آنها (نسبت حجم فضای خالی ماده به حجم ظاهری ماده) بین ۲۰٪ تا ۹۵٪ باشد، مواد متخلخل^۲ نامیده می‌شوند. مواد نانومتخلخل دارای حفره‌هایی در ابعاد نانو (قطر کمتر از ۱۰۰ nm) بوده و بخش قابل توجهی از حجم آنها را فضای خالی تشکیل می‌دهد. وجود حفره‌های بسیار ریز و مرتبط به هم موجب ایجاد سطح ویژه (نسبت سطح به جرم) بسیار زیادی در مواد نانومتخلخل می‌شود. از مهم‌ترین خواص مواد نانومتخلخل می‌توان به سطح ویژه بسیار بالا، نفوذپذیری یا تراوایی بالا و عایق بودن در برابر گرما و صوت اشاره کرد.

مواد نانومتخلخل بر اساس اندازه حفره‌ها به سه گروه مواد ریز حفره^۳ (دارای حفره‌هایی با قطر کمتر از ۲ nm)، مواد متوسط حفره^۴ (دارای حفره‌هایی با قطر ۵۰ - ۲ nm) و مواد درشت حفره^۵ (دارای حفره‌هایی با قطر بیشتر از ۵۰ nm) تقسیم‌بندی می‌شوند. مواد نانومتخلخل در زمینه‌های بسیاری کاربرد دارند؛ استفاده از این نوع نانومواد در انواع فیلتر و غشاء، تصفیهٔ آب، عایق صوتی و حرارتی، کاتالیست و پایه‌ی کاتالیست، ذخیره‌سازی هیدروژن و حامل دارو از جمله‌ی کاربردهای گستردهٔ مواد نانومتخلخل است. انواع آبروژل‌ها^۶، زئولیت‌ها^۷ و اکسید آلومینیوم آندایز شده (AAB)^۸ از شناخته‌شده‌ترین مواد نانومتخلخل هستند.

نانومواد ریزدانه: تمامی مواد از اتم‌ها یا یون‌ها تشکیل شده‌اند. اگر این اجزای سازنده با نظم و الگوی مشخص کنار یکدیگر قرار گرفته باشند (نظم دوربرد و تکرارشونده)، ماده دارای نظم بلوری خواهد بود، در غیر این صورت ماده بی‌شکل است. در شرایط واقعی غالباً این نظم ساختاری در مواد بلورین سراسری نبوده و کل ماده را در بر نمی‌گیرد؛ بلکه ماده از ذرات کوچک‌تری که در هر کدام این نظم بلوری وجود دارد، تشکیل شده است؛ برای مثال یک شاخه نبات را در نظر بگیرید (شکل ۱۳-آ)، این قطعهٔ نبات از تعداد زیادی دانه‌های^۹ بلورین متصل‌به‌هم تشکیل شده است. نوع نظم ساختاری (شبکهٔ بلور) در تمامی این دانه‌ها یکسان است و صرفاً جهت‌گیری این دانه‌های بلوری کوچک نسبت به هم متفاوت است. محل اتصال این دانه‌ها که در اصطلاح مرزدانه^{۱۰} نامیده می‌شود، فاقد ساختار بلوری بوده و محل گذار جهت نظم بلوری از دانه‌ای به دانهٔ دیگر است (شکل ۱۳-ب). چنین ساختارهایی که از اتصال تعداد زیادی دانه‌های بلورین به هم شکل گرفته‌اند را مواد چند بلوری^{۱۱} می‌نامند. با این وجود این امکان وجود دارد که یک جسم صرفاً از یک بلور تشکیل و دربردارندهٔ هیچ دانه‌ای نباشد. چنین موادی را مواد تک‌بلور^{۱۲} می‌نامند. دانه‌بندی نه‌تنها در مواد حجیم

¹ Porosity

² Porous

³ Microporous

⁴ Mesoporous

⁵ Macroporous

⁶ Aerogel

⁷ Zeolite

⁸ Anodized aluminum oxide

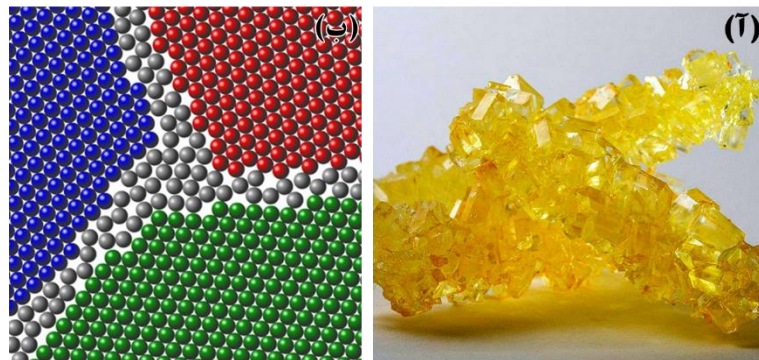
⁹ Grain

¹⁰ Grain boundary

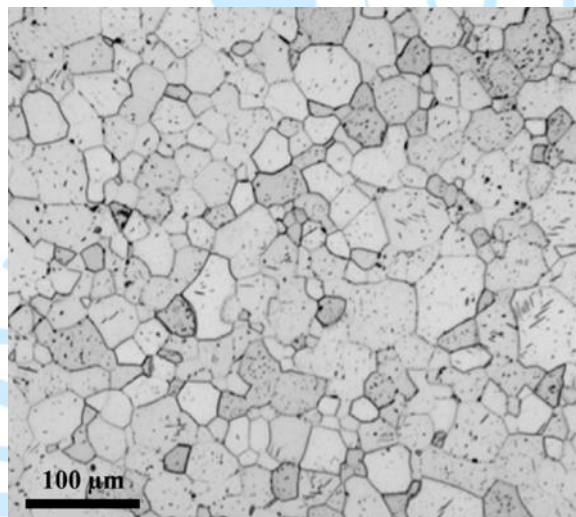
¹¹ Polycrystalline

¹² Single crystal

دیده می‌شود بلکه در نانومواد نیز وجود دارد. به‌عنوان مثال، نانوذرات ممکن است خود از چندین دانه تشکیل شده باشند.



شکل ۱۳: (آ) تصویری از یک شاخه نبات و (ب) طرحی از مرز دانه‌ها در یک ماده چندبلوری.



شکل ۱۴: تصویر میکروسکوپ نوری از دانه‌بندی یک قطعه فلز تیتانیوم.

بسیاری از موادی که در اطراف ما وجود دارد مواد چندبلوری هستند؛ از جمله انواع فلزات. شکل ۱۴ تصویر میکروسکوپی از دانه‌های یک قطعه تیتانیوم را نشان می‌دهد؛ در این تصویر مرز دانه‌ها به خوبی قابل مشاهده است. اتم‌های موجود در مرز یک دانه متعلق به هیچ‌کدام از دانه‌ها نیستند؛ مرز دانه‌ها نوعی نقص بلوری به شمار می‌آند که تأثیر زیادی روی خواص فیزیکی مواد چندبلوری دارند.

سومین گروه اصلی نانومواد حجیم، مواد نانوبلورین یا نانومواد ریزدانه هستند که ابعاد دانه‌ها در این مواد در محدوده نانومتری است. اگر ابعاد دانه‌ها در مواد چندبلوری کمتر از 100 nm باشد، به آنها مواد نانوبلورین گفته می‌شود. ریزدانه شدن مواد چند بلوری موجب بهبود چشم‌گیر برخی از خواص مکانیکی آنها از جمله استحکام آنها می‌شود؛ از این رو امروزه مواد نانوبلورین مورد توجه قرار گرفته‌اند.

منبع مقاله: کتاب مفاهیم اولیه فناوری نانو و کاربردهای آن در فیزیک، نویسنده: سعید ساعدی