# مفاهیم اولیه فناوری نانو و کاربردهای آن در فیزیک

# تدوین و گردآوری: سعید ساعدی

سرشناسه :	ساعدی، سعید، ۱۳۶۶ -، گردآورنده	
عنوان و نام پدیدآور :	مفاهیم اولیه فناوری نانو و کاربردهای آن در فیزیک/ تدوین و گ	فائزه ابراهیمیانغازانی [و دیگران] ؛
:	ويراستاران علمي فائزه كاشانيان، مرضيه شيرازي.	
مشخصات نشر	تهران: دیدار پارسیان، ۱۳۹۹.	
مشخصات ظاهری	۱۹۰ص.	
شابک	٩٧٨-۶٠٠-۵۵٩۲۶۶-۵	
: وضعیت فهرست نویسی	فيپا	
: یادداشت	با همکاری فائزه ابراهیمیانغازانی، محمدامین کاتبصابر، علی ان	
موضوع	مواد نانوساختار	
موضوع :	Materials Nanostructured	
موضوع:	علوم نانو	
مەضەع :	Nanoscience	
موضوع :	نانوتكنولوژي	
مەضەع :	Nanotechnology	
مەضەع :	یات نانوفتونیک	
مەضەع	Nanophotonics	
بر بری شناسه اف وده	ا اداهیمیان غازانی، فائزه، ۱۳۷۵–	
شناسه اف وده	کاشانیان، فائزه، ۱۳۶۱-، ویراستار	
: شناسه اف وده	شیرازی، مرضبه، ۱۳۶۳ – ، ویراستار	
ده بندی کنگ ه	TAF)//9	
رده بندی دیم ب	۵/۶۲۰	
ر بی - بر یی شماره کتابشناسی ملی	۶۱۴۸۷۷۸	
	///	
	<u> </u>	
<b>نشر دىدار بارسىان:</b> توان، خيا	ابان ایرانشهر شمالی،کوچه	
		اموزش
ایرانشهر، پلاک ۸، طبقه ۴، واحد	۱۳ – تلفن: ۸۸۳۲۱۵۹۷ س	انو
تلف م ک بخش (۴	(+977486488	اليديه أموزش نانو
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		کد تابیدیه: ۹۹۰۲۰۲۳۴۰

www.nanoclub.ir

(لطفا نظرات، پیشنهادات و انتقادات خود را در مورد این کتاب با ما در میان بگذارید.)

# مفاهيم اوليه فناوري نانو

# و کاربردهای آن در فیزیک

سعید ساعدی	نویسنده:
فائزه کاشانیان، مرضیه شیرازی	ويراستاران علمي:
گلناز ناظری	ويراستار ادبي:
عباس سندروسي	طراحی و صفحه آرایی:
اوّل/ پاییز ۱۳۹۹	نوبت چاپ:
۱۰۰۰ نسخه	شمارگان:
پايدار	چاپ:
٩٧٨ <i>-۶۰۰-</i> ۵۵٩۲ <i>-۶۶-</i> ۵	شابک:
۵۲٬۰۰۰ تومان	قيمت:
حق چاپ محفوظ است.	

# پیشگفتار ناشر

آغاز فعالیتهای انتشاراتی شرکت پژوهشگران نانوفناوری بهعنوان اولین تشکل غیر دولتی حوزه علوم و فناوری نانو در ایران، به سال ۱۳۸۰ باز میگردد. بسیاری از اولینهای نانو در ایران، از جمله انتشار اولین کتاب فارسی با نام "نانوتکنولوژی آیینه تکنولوژی آفرینش" به دست اعضای همین تیم صورت گرفته است.

در طی این سالها، با معرفی و شناخته شدن هر چه بیشتر فناوری نانو در ایران، فعالیت مراکز سیاستگذاری، دانشگاهی، تحقیقاتی و بعدها بخش خصوصی با هم افزایی بالایی رخ داد که نهایتا به پیشرفت مثالزدنی کشور در حوزه فناوری نانو منجر شد.

از دغدغههای اصلی ناشر در طول دو دهه فعالیت، تربیت نسل پژوهشگر در ایران بوده و تضمین ادامه این راه را منوط به آموزش صحیح و گسترده این فناوری برای نسلهای بعدی میداند. رویکرد این مجموعه، همراهی با نسلی است که میخواهد فناوریهای نوین را از ابتدا با استانداردهای روزآمد پژوهشی و آموزشی فرا گیرد و خود را برای ورود به بازار کار، قبل از ورود به دانشگاه آماده نماید.

یکی از نقاط کمتر پرداخته شده در این حوزه در سالهای گذشته، سرفصلهای استاندارد و دستهبندی دقیق مفاهیم پایهای و نظری از یک سو و مهارتهای آزمایشگاهی و محاسباتی از سوی دیگر بوده است. در این بخش، کشور نیازمند محتواهای زنجیرهای استاندارد به زبان فارسی است که با بیان ساده و قابل فهم، مرجع آموزشی کاملی از پیشنیازهای فناوری نانو برای دانشآموزان در پایههای تحصیلی متفاوت باشد. با توجه به نیاز مذکور، ناشر وظیفه خود میداند محتوای آموزشی دقیق و با بالاترین استاندارد آموزشی را منتشر کرده و در دسترس آیندهسازان علم و فناوری این مرز و بوم قرار دهد.

بدیهی است هیچ کار انتشاراتی علیرغم کوشش فراوان تیم تالیف و ویراستاری، خالی از ایراد نخواهد بود. امید آنکه اطلاعرسانی پژوهشگران و صاحبنظران به ناشر در خصوص نقطه نظرات و پیشنهادهای اصلاحی، مسیر را برای بهبود محتوا و رفع نواقص احتمالی در چاپهای بعدی هموار نماید.

ناشر

## پیشگفتار نویسنده

تلاشهای فیزیکدانان و شیمیدانهای متعددی در طول سالیان دراز موجب شد تا ماهیت اتمها و مولکولها برای انسان شناخته شده و انسان به ابعاد بسیار کوچک آنها واقف شود. با این وجود، در سالهای نه چندان دور امکان مشاهده اتمها و مولکولها و نیز کنترل تک اتمها و مولکولها همچون رویایی دستنیافتنی برای دانشمندان بود. با این حال، با پیشرفتهای صورت گرفته در زمینهٔ ساخت ابرازهای مختلف علمی، این امر به تدریج از یک رویای دور تبدیل به یک واقعیت گردید. امروزه کنترل ماده و کار کردن با مقادیر بسیار اندک ماده که از تعداد اندکی اتم و مولکول تشکیل شده است کاری عادی در بسیاری از آزمایشگاههای پژوهشی است.

کارکردن با تک اتمها و تک مولکولها و یا مقدار بسیار اندکی از ماده که شامل مقدار محدودی اتم یا مولکول است نیازمند کار در مقیاس بسیار کوچکی است که آن را با نام «مقیاس نانو» می شناسیم. لغت نانو دارای ریشهٔ یونانی و به معنی کوتوله است که اشاره به پدیدههایی در ابعاد بسیار کوچک دارد. از لغت نانو در موارد بسیاری بهعنوان پیشوند استفاده شده است که در همه موارد دلالت بر یک میلیاردم (<sup>1</sup> ۰۱) نانو در موارد بسیاری بهعنوان پیشوند استفاده شده است که در همه موارد دلالت بر یک میلیاردم (<sup>1</sup> ۰۱) دارد؛ یکی از مرسومترین موارد، استفاده از عبارت نانوفاراد (nr) برای نشان دادن ظرفیت خازنهای الکتریکی است. بر این اساس، بهعنوان یک لغت نانو، به معنای یک میلیاردم است. با این وجود امروزه لغت نانو با کاربردی بسیار متفاوت از معنای اصلی خود مورد استفاده قرار می گیرد و اشاره به فناوریهای بسیار پیشرفته و یا محصولات حاصل از این فناوریها دارد که دارای یک نقطه اشتراک هستند: اندازهٔ بسیار پیشرفته و یا محصولات حاصل از این فناوریها دارد که دارای یک نقطه اشتراک هستند: اندازهٔ بسیار پیشرفته و یا محصولات حاصل از این فناوریها دارد که دارای یک نقطه اشتراک هستند: اندازهٔ بسیار پیشرفته و یا محصولات حاصل از این فناوریها دارد که دارای یک نقطه اشتراک هستند: اندازهٔ به میاری یک نقطه اشتراک هستند: اندازهٔ بسیار پیشرفته و یا محصولات حاصل از این فناوریها دارد که دارای یک نقطه اشتراک هستند: اندازهٔ دانومتر (nm) .

ریچارد آدولف زیگموندی<sup>۲</sup> (برندهٔ جایزهٔ نوبل شیمی در سال ۱۹۲۵) اولین فردی بود که از عبارت نانومتر برای توصیف اندازهٔ ذرات استفاده کرد. او بر روی ذرات بسیار کوچک طلا که در محیط مایع معلق بودند مطالعه می کرد و از نانومتر برای بیان اندازه این ذرات استفاده کرد. آلبرت انیشتین<sup>۴</sup> (برندهٔ جایزهٔ نوبل فیزیک در سال ۱۹۲۱) چهرهٔ مشهور دیگری است که از عبارت نانومتر استفاده کرده است؛ او اندازهٔ مولکول شکر را در حدود ۱۹۳۱ تخمین زد. با این وجود در این سال ها امکان مشاهدهٔ مستقیم چنین ذرات کوچکی مقدور نبود. در سال ۱۹۳۱ اولین نمونه از میکروسکوپهای الکترونی توسط ارنست روسکا<sup>۵</sup> (برندهٔ جایزهٔ نوبل فیزیک در سال سال ۱۹۳۱ اولین نمونه از میکروسکوپهای الکترونی توسط ارنست روسکا<sup>۵</sup> (برندهٔ جایزهٔ نوبل فیزیک در سال نوری فراهم می کنند را داشت. این دستاورد امکان مشاهدهٔ ذرات بسیار کوچک را به تدریج فراهم کرد. در سال ۱۹۸۹ ریچارد فایمن<sup>۶</sup> (برندهٔ جایزهٔ نوبل فیزیک در سال ۱۹۶۵) در سخنرانی مشهوری از فرصتهای مهیجی صحبت کرد که در صورت فراهم شدن امکان کنترل تک اتمها و تک مولکول ها و کار در سال ۱۹۵۹ می از این می می میزانی مولی این سخنرانی را به عنوان اولین ایده پردازی در مورد فاوری های کرد. از

- 2- Nanometer
- 3- Richard Adolf Zsigmondy
- 4- Albert Einstein
- 5- Ernst Ruska
- 6- Richard Feynman

العلاليهم

<sup>1-</sup> Nanofarad

امکان کار در ابعاد اتمها و مولکول ها را دارند، فرض میکنند. در سال ۱۹۷۴ نوریو تانیگوچی <sup>'</sup> برای اولین بار از عبارت فناوری نانو<sup>۲</sup> برای توصیف فناوری مورد استفاده در ساخت ادوات نیمهرسانا استفاده کرد. در سال ۱۹۸۱ و با اختراع نسل جدیدی از میکروسکوپها توسط گرد بینینگ<sup>۲</sup> و هنریش روهر<sup><sup>†</sup></sup> (برندگان جایزهٔ نوبل فیزیک در سال ۱۹۸۶) نه تنها امکان مشاهدهٔ تک اتمها فراهم شد، بلکه امکان کنترل و جابهجایی تک به تک آنها نیز مقدور شد. این امر را میتوان آغاز انقلابی بزرگ در علم و فناوری در نظر گرفت که حاصل آنرا امروزه با نام فناوری نانو میشناسیم.

اسامی بزرگ و برندگان جایزهٔ نوبلی که در این چند خط از آنها نام برده شد و در مسیر شکل گیری علم و فناوری نانو نقش داشتهاند، نشاندهندهٔ اهمیت بسیار آن برای بشریت است. امروزه فناوری نانو با معرفی محصولاتی نوین، متنوع و کارآمد گره گشای بسیاری از مشکلات بشریت است. همچنین، فناوری نانو تأثیر بسیار چشم گیری بر سایر شاخههای فناوری داشته است و موجب پیشرفتهای بسیاری در آنها شده است. به نمکلی تنگاتنگ با تمامی علوم تجربی و مهندسی بشر در ارتباط بوده و یک علم بینرشتهای<sup>۵</sup> به شمار میرود. از اینرو شناختی صحیح و ساختارمند از علم و فناوری نانو یکی از ضروریات عصر حاضر است.

کتاب حاضر سعی دارد با تکیه بر دانش فیزیک مقدماتی مخاطب و با کمک گرفتن از منابع علمی روز، مفاهیم اولیه و مقدماتی فناوری نانو را با زبانی ساده به مخاطب آموزش دهد. اثر حاضر شامل پنج فصل است که در فصل اول به معرفی مواد پیرامون ما و دستهبندی آنها میپردازد. در فصل دوم مفهوم خواص ماده بررسی شده و تأثیر کاهش اندازه بر روی برخی از خواص اصلی مواد جامد به زبانی ساده بررسی می گردد. در فصل سوم برخی از کاربردهای فناوری نانو و پیشرفتهای ناشی از ورود فناوری نانو به این حوزههای فناورانه مورد بررسی قرار گرفته است. فصل چهارم برخی از روشهای مرسوم برای تصویر برداری و مطالعهٔ ریزساختار مواد را معرفی کرده و در نهایت فصل پنجم به بیان مقدماتی روشهای مدل سازی و شبیه سازی پدیدههای نانومقیاس می پردازد. برای مطالعه مفاهیم پایهای یا کسب اطلاعات بیشتر در مورد مطالبی که در متن کتاب با علامت \* مشخص شدهاند می توانید به منابع ذکر شده در نمایه ارائه شده در انتهای کتاب مراجعه نمایید.

این اثر به سفارش ستاد ویژه توسعه فناوری نانو و همکاری جمعی از برگزیدگان ادوار المپیاد دانش آموزی علوم و فناوری نانو با سرپرستی اینجانب تدوین و گردآوری شده است. ذکر این نکته ضروری است که این کتاب خالی از نقص نبوده و همواره نیازمند پیشنهادهای سازندهٔ خوانندگان محترم، اساتید و متخصصان برای ارتقای خود میباشد. از اینرو گردآورندگان این اثر همواره مشتاق دریافت نظر و پیشنهادهای ارزشمند خوانندگان محترم در جهت ارتقای کیفیت کتاب در چاپهای آینده هستند. امیدواریم گردآوری و تدوین این اثر، گامی کوچک در راستای ارتقای علمی مخاطبان عزیز باشد.

#### سعید ساعدی

<sup>1-</sup> Norio Taniguchi

<sup>2-</sup> Nanotechnology

<sup>3-</sup> Gerd Binnig

<sup>4-</sup> Heinrich Rohrer

<sup>5-</sup> Interdisciplinary

	— فهرست مطالب ⊢
۳	فصل اول:مواد پیرامون ما
۱۴	مقدمه
۱۴	تقسیمبندی مواد از نظر حالت
۱۵	گاز
۱۵	مايع
۱۵	جامد
۱۵	پلاسما
18	برهمکنشهای بین ذرات ماده
۱γ	مواد بلورین و مواد بیشکل
۱۸	مشخصههای شبکه بلور
۲۳	صفحههای بلوری
۲۵	تقسیمبندی مواد از نظر اندازه
۲۶	علم و فناوری نانو
۲۷	تقسیمبندی نانومواد بر اساس ابعاد
۲۸	نانومواد صفربعدی
۲۹	نانومواد یکبعدی
۳۱	نانومواد دوبعدی
٣٢	نانومواد سەبعدى

۳۵	فصل دوم:خواص مواد
٣۶	مقدمه
٣۶	خواص جدید در ابعاد نانو
۳۷	ساختار الکترونیکی مواد
٣٩	مواد رسانا، نیمهرسانا و نارسانا
٣٩	مواد رسانا و نارسانا
٣٩	مواد نیمهرسانا
۴۰	ساختار الکترونیکی نانومواد
۴۱	فیزیک حاکم بر ابعاد نانو

۴۳	دستهبندی نانومواد براساس ابعاد محدودیت کوانتومی
۴۳	اثر افزایش سطح بر رفتار مواد
۴۵	تغییر خواص در ابعاد نانو
۴۵	تغییر رنگ نانوذرات
۴۶	گذار بین نوارهای انرژی
۴۷	پلاسمون سطحی موضعی
۵۰	برهمنهی امواج
۵۳	پراکندگی نور
۵۴	کاهش دمای ذوب نانوذرات
۵۵	تغییر خواص مغناطیسی نانوذرات
۵۵	مواد مغناطیسی
۵۸	پسماند مغناطیسی
۶۰	خواص مغناطیسی مواد در مقیاس نانو
۶۲	افزایش استحکام مواد ریزدانه

۶۵	فصل سوم:کاربردهای فناوری نانو
<i>۶۶</i>	مقدمه
<b>FF</b>	فناوری نانو و افزایش سرعت پردازش اطلاعات
<b>FF</b>	ترانزیستور چیست؟
۶۸	کوچکشدن ترانزیستورها و قانون مور
γ۰	محدودیتهای قانون مور
ری ۲۱	چالشهای ساخت ترانزیستورها در ابعاد نانومتر
۲۲	نانوترانزیستورها
የሥ	فناوری نانو و ذخیرهسازی اطلاعات
٧۴	ذخیرهسازی مغناطیسی اطلاعات
٧۶	ذخیرهسازی نوری اطلاعات
Υλ	ذخیرہسازی الکترونیکی اطلاعات
Υλ	انرژی خورشید
٧٩	سلولهای خورشیدی

شهرست دخالي

مفاهیم اولیه فناوری نانو و کاربردهای آن در فیزیک

۸۲	نسلهای مختلف سلولهای خورشیدی
٨۴	فناوری نانو چگونه میتواند عملکرد سلولهای خورشیدی را بهبود دهد؟
۸۵	مواد هوشمند و کاربردهای آنها
٨۶	چه موادی هوشمند هستند؟
٨۶	مثالهایی از مواد هوشمند
٨۶	اثر حافظهٔ شکل
٨٩	مواد پیزوالکتریک
۹۰	مواد هوشمند رنگی
91	مواد هوشمند مغناطیسی
91	مواد خودترمیمشونده
۹۳	فناوري نانو و مواد هوشمند

۹۵	فصل چهارم:مطالعه ریزساختار نانومواد
٩۶	مقدمه
٩۶	تصویربرداری از مواد
٩٧	محدودیتهای میکروسکوپهای نوری
99	استفاده از پرتو الکترونی برای تصویربرداری از مواد
100	مبانی تصویربرداری با استفاده از پرتو الکترونی
101	محفظه خلاء
۱۰۲	ایجاد پرتو الکترونی
۱۰۵	همگرا کردن و هدایت پرتو الکترونی
۱۰۶	برهمکنش پرتو الکترونی با ماده
109	تصویربرداری با استفاده از الکترونهای عبوری
109	آشکارسازی الکترونهای عبوری
m	ساختار و اجزای میکروسکوپ الکترونی عبوری
אוו	کارکرد میکروسکوپ الکترونی عبوری
ى عبورى ١١٣	آمادهسازی نمونه برای تصویربرداری میکروسکوپ الکترون
1116	حالتهای تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی عبوری
ادی	حالتهای تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی عبوری عا

فهرست مطالب

حالتهای تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی
تصویربرداری با استفاده از الکترونهای برگشتی و ثانویه۱۱۹
آشکارسازی الکترونهای ثانویه و برگشتی۱۱۹
ساختار و اجزای میکروسکوپ الکترونی روبشی۱۲۱
کارکرد میکروسکوپ الکترونی روبشی۳۷
آمادهسازی نمونه برای تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی
حالتهای تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی
مطالعه ترکیب شیمیایی نمونهها با استفاده از میکروسکوپهای الکترونی
آشکارسازی پرتوهای ایکس۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰
مطالعه ترکیب شیمیایی نمونه با استفاده از میکروسکوپهای الکترونی
تهیه تصویرنگاشت عنصری
تصویربرداری از میکروسکوپهای پروبی روبشی
میکروسکوپ تونلی روبشی۱۳۶
تونلزنی کوانتومی و جریان الکتریکی تونلی۱۳۶
تصویربرداری از سطح با استفاده از جریان تونلی
سایر کاربردهای میکروسکوپهای تونلی روبشی
میکروسکوپ نیروی اتمی ۱۴۰
نیروی اتمی۱۴۱
تصویربرداری از سطح با استفاده از نیروی اتمی۱۴۳
حالتهای تصویربرداری میکروسکوپ نیروی اتمی۱۴۵
تأثیر شکل سوزن بر کیفیت تصویر ۱۵۰
مطالعه ساختار بلوری مواد۱۵۳
پرتو ایکس۱۵۳
تولید پرتو ایکس برای کاربردهای مختلف۱۵۴
برهمکنش پرتو ایکس با ذرات۱۵۸
پراش پرتو ایکس۱۵۸
یادآوری برخی نکات از بحثهای پیشین
تحلیل کیفی دادههای پراش پرتو ایکس۱۶۲
تحلیل کمی دادههای پراش پرتو ایکس۱۶۴

فهرست مطالب

مفاهيم اوليه فناوري نانو و كاربردهاي آن در شيمي

۱١

180	مزایا و معایب روش پراش پرتو ایکس
نی	مطالعه ساختار بلوری با استفاده از پراش پرتو الکترو

# فصل پنجم:مقدمه ای بر مدلسازی و شبیهسازی پدیدهها در ابعاد نانو ....... ۱۶۹

Ιγ۰	مقدمه
۱۷۰	مدلسازی
۱۷۰	مدل علمی چیست؟
١٧١	چرا مدلسازی میکنیم؟
ועץ	انواع مدلها
ואר	مدلهای فیزیکی
IVF	مدل ریاضی
١٧۴	اعتبارسنجی یک مدل
۱۷۶	شېيەسازى
۱۷۹	شبیهسازی دینامیک مولکولی
۱۸۰	هنگرد
١٨١	درشتدانهسازی
אץ	فاصلۀ قطع
אא	شبیهسازی کوانتومی
ለ۴	مراجع



نویسنده همکار در این فصل: فائزه ابراهیمیان غازانی

🗞 مقدمه:

مدادی که در دست گرفته اید، لباسی که پوشیده اید و هر آنچه از بدو تولد با آن سروکار داشته اید، حتی مواد سازندهٔ بدن انسان، همه ماده <sup>۱</sup> اند. در واقع، ما در دنیایی متولد می شویم و رشد می کنیم که مادی است؛ از این رو یکی از راههای اساسی شناخت دنیای پیرامون ما شناخت صحیح مواد است. ما به هر چیزی که فضا را اشغال کند، یعنی جرم و حجم داشته باشد، هرچند بسیار ناچیز، ماده می گوییم. تمام مواد دارای دو ویژ گی جرم و حجماند و از مولکول ها و اتم ها تشکیل شده اند.

شاید تاکنون این سؤال برایتان پیش آمده باشد که اگر مواد از مولکولهای جدا از هم تشکیل شدهاند، پس چرا صندلیای که روی آن مینشینیم یا تختخوابی که روی آن میخوابیم چنان محکماند که وزنمان را تحمل میکنند و مولکولهایشان از هم جدا نمیشوند؟ زیرا بین مولکولها نیروهایی وجود دارند که باعث میشوند آنها کنار یکدیگر باقی بمانند. توانایی این نیروها برای کنار هم نگهداشتن ذرات تشکیلدهندهٔ ماده، مشخص کنندهٔ حالت ماده است؛ برای مثال، نیرویی که مولکولهای آب را در یک قطعه یخ کنار هم نگه میدارد، قوی تر از نیرویی است که مولکولهای آب جاری را کنار هم نگه میدارد؛ ازاینرو آب مایع شکل مشخصی ندارد و جاری میشود؛ برخلاف یخ که درای شکل مشخصی است و مادامی که ذوب نشده باشد، شکل خود را حفظ میکند. نیروهای بین مولکولهای آب در بخار آبی که از کتری ِ درحال جوش خارج میشود بسیار ضعیف تر از نیروی بین مولکولهای یخ است.

# 😣 تقسیمبندی مواد از نظر حالت

مواد در شرایط طبیعی معمولاً در سه حالت گاز<sup>7</sup>، مایع<sup>7</sup> و جامد<sup>۲</sup> هستند. در صورت بروز شرایط خاص، ماده وارد حالت چهارم میشود که پلاسما<sup>6</sup> نام دارد. در شکل (۱) چهار حالت طبیعی ماده و نحوهٔ قرارگیری ذرات سازندهٔ آنها نشان داده شده است. در ادامه، این چهار حالت اصلی ماده معرفی میشوند.



شکل ۱: چهار حالت طبیعی ماده و نحوهٔ قرارگیری ذرات سازندهٔ آنها در کنار یکدیگر

- 1- Matter
- 2- Gas
- 3- Liquid
- 4- Solid
- 5- Plasma

مواد پیرامون ما

وتعسل الأل

یک گاز ممکن است از اتمهای منفرد، مانند هلیم (He)؛ مولکولهای عنصری، مانند اکسیژن (O<sub>2</sub>) و مولکولهای ترکیبی، مانند کربن مونوکسید (CO) تشکیل شده باشد. فاصلهٔ بین ذرات سازندهٔ گازها بسیار زیاد است، به گونهای که میتوان از نیروی بین آنها صرفنظر کرد. مولکولها و اتمهای یک گاز وابستگی زیادی به سایر مولکولها و اتمها ندارند و آزادانه حرکت میکنند. این امر موجب میشود که ذرات تشکیل دهندهٔ گاز فقط هنگام برخوردهای تصادفی با یکدیگر، که در مسیر حرکت آزادانهٔ خود دارند، برهمکنش داشته باشند. این نوع حرکت در اصطلاح، حرکت براونی <sup>۱</sup> نامیده میشود. گازها چگالی بسیار کمی دارند، به آسانی فشردهسازی میشوند و اگر در فضای بسته قرار بگیرند، همهٔ آن را اشغال میکنند.

#### 💿 مايع

مایعها نیز مانند گازها میتوانند از تکاتم، مانند جیوه (Hg)؛ مولکول عنصری، مانند برم (Br<sub>2</sub>) و مولکول ترکیبی، مانند آب (H<sub>2</sub>0) تشکیل شده باشند. نیروهای موجود میان ذرات تشکیلدهندهٔ مایعات قویتر از گازها است ولی بهاندازهای نیست که مانع آزادی حرکت مولکولهای مایع شوند. این نیروها باعث میشوند که فاصلهٔ بین ذرات مایع، در مقایسه با گاز، بسیار کمتر باشد. ذرات مایع میتوانند حرکت کنند، روی هم بلغزند و جریان داشته باشند. مواد مایع حجم مشخصی دارند و معمولاً، قابلفشردهسازی نیستند ولی شکل ظرف را به خود می گیرند.

#### 🖲 جامد

مواد جامد نیز به صورت تکاتمی، مانند طلا (Au)؛ مولکول عنصری، مانند ید (I<sub>2</sub>) و مولکول ترکیبی مانند شیشه (SiO<sub>2</sub>) وجود دارند. در حالت جامد، نیروهای بین ذرات تشکیل دهندهٔ ماده بسیار قویتر از انرژی جنبشی این ذرات در حالت مایع یا گاز است؛ بهنحوی که نیروهای قوی بین مولکولی با غلبه بر این انرژی سبب می شوند که ذرات سازندهٔ مواد جامد نتوانند آزادانه حرکت کنند و فقط در فاصلهٔ بسیار کم از یکدیگر (حدود ۰/۱ نانومتر ) در مکان خود ارتعاش کنند. بنابراین، مواد جامد شکل و حجم ثابتی دارند و در برابر تغییر شکل مقاومت می کنند.

#### 💿 پلاسما

علاوه بر سه حالت اصلی مواد که بیان شد، حالت چهارمی نیز وجود دارد که به آن پلاسما می گویند. بی شک شما تاکنون پلاسما را دیدهاید و فقط از ماهیت آن اطلاع دقیقی نداشته اید. شاید برایتان جالب باشد که بدانید بیشتر مواد در حالت پلاسما هستند؛ شعلهٔ آتش مثالی از حالت پلاسما است. رعدوبرق و شفق قطبی هم نمونه هایی از پدیده های طبیعی اند که نمایشی از ورود ماده در حالت پلاسما هستند؛ موادی که در شرایط عادی ناپایدار و گذرا بوده و با رفع شدن عوامل محرک از بین می روند.

پلاسما بسیار به حالت گازی ماده شبیه است؛ زیرا نیروی مؤثر زیادی بین ذرات تشکیل دهندهٔ پلاسما، که توانایی کنار هم نگه داشتن آنها را داشته باشد، وجود ندارد. تفاوت اصلی این دو حالت ماده در یونیزه بودن ذرات تشکیل دهندهٔ پلاسما ست. بنابراین، پلاسما مجموعهای از ذرات باردار الکتریکی (با بارهای غیرهمنام) است که آزادانه در محیط پیرامون خود حرکت میکنند. میتوان یک گاز را با استفاده از روشهایی که بتواند ذرات تشکیل دهندهٔ آن را یونیزه کند<sup>۳</sup>\* به پلاسما

<sup>1-</sup> Brownian motion

۲- یک نانومتر (nanometer) برابر ۱ میلیاردم متر یا ۱۰<sup>-۹</sup> متر است.

۳- برای مطالعه بیشتر در مورد موضوعاتی که با \* مشخص شدهاند به منابع معرفی شده در نمایه انتهای کتاب مراجعه نمایید.

تبدیل کرد؛ حرارتدادن گاز یا قراردادن آن در معرض میدان قوی الکتریکی روشهایی است که یک گاز خنثی را به پلاسما تبدیل میکند. شاید در شرایط عادی زمین، پلاسما حالتی نادر و غیرمعمول از ماده باشد اما در جهان هستی حالتهایی از ماده، که در شرایط معتدل زمین فراواناند (حالتهای جامد و مایع)، بسیار کمیاب و غیرعادی هستند. ستارهها به سبب گرمای بسیار زیاد و سحابیها و گازهای بینستارهای به دلیل پرتو فرابنفش ساطعشده از ستارهها یونیزه شدهاند. پرتوهای پرانرژی خورشید لایهٔبالای جو زمین را یونیزه کردهاند. این لایه، که یونوسفر <sup>۱</sup> نام دارد، از پلاسما تشکیل شده است و با داشتن قابلیت جذب پرتوهای ایکس، فرابنفش، تابشهای خورشیدی، بازتاب امواج کوتاه و رادیویی نقشی اساسی در برقراری ارتباط رادیویی در سرتاسر جهان دارد.

در پلاسما، بخشی از الکترونها بهطور کامل از بند جاذبهٔ هستهٔ اتم رها شده و آزادانه در فضای پلاسما حرکت میکنند. با جداشدن یک یا چند الکترون از یک اتم خنثی، اتم دارای بار مثبت میشود و به یون تبدیل میگردد. با توجه به برابری بار منفی الکترونها و بار مثبت یونهای تولیدشده، پلاسما از نظر الکتریکی خنثی است. الکترونهای آزاد موجود در پلاسما موجب انتقال جریان الکتریکی میشوند؛ به بیانی سادهتر، پلاسما یک نوع گاز رسانا است.

## 🚸 برهمکنشهای بین ذرات ماده

برهمکنشهای بینذرهای به دو دستهٔ درونمولکولی و بینمولکولی تقسیم میشوند. در هر مولکول، نیروهای درونمولکولی اتمها را کنار یکدیگر نگه میدارند. این برهمکنشهای درونمولکولی ناشی از نیروهایی است که باعث ایجاد پیوند شیمیایی بین اتمها و درنتیجه، تشکیل مولکولها میشوند. پیوند یونی\* میان ذرات تشکیلدهندهٔ نمک خوراکی (NaCl)، پیوند اشتراکی\* (کووالانسی) میان اتمهای اکسیژن و کربن در مولکولی کربن دیاکسید (CO) و پیوند فلزی\* میان اتمهای آهن در یک تودهٔ آهن، نمونههایی از برهمکنشهای درون مولکولی است.

مولکول مایعات و جامدات با نیروهای بینمولکولی در کنار یکدیگر قرار میگیرند. این نیروها، که به افتخار فیزیکدان هلندی به نیروهای واندروالس معروف شدهاند، بهصورت نیروهای جاذبه یا دافعه بین مولکولهای نزدیک هم ایجاد میشوند و نسبت به نیروهای درون مولکولی ضعیفترند؛ برای مثال پیوند اشتراکی مولکول آب، که بین اتمهای تشکیلدهندهٔ آن وجود دارد، بسیار قویتر از نیروی جاذبه (پیوند هیدروژنی) بین مولکول آب و سایر مولکولهای مجاورش است. انواع برهمکنشهای واندروالسی، ازجمله پیوندهای هیدروژنی، در اثر برهمکنش دوقطبیهای لحظهای یا دائمی بین مولکولها تشکیل میشود. دوقطبیهای لحظهای مولکولهایی هستند که بهصورت مقطعی و در پی القای میدان الکتریکی کوچک قطبیده شدهاند. قطبش لحظهای به این معنی است که توزیع بار الکتریکی بر روی مولکول غیرقطبی بهصورت موقتی از حالت تعادلی و یکنواخت منحرف شده است و باعث توزیع نامتقارن ابرالکترونی آن میشود. این امر به ایجاد قطب مثبت و منفی بر روی مولکول می انجامد و درنتیجه، امکان برهمکنش با محیط پیرامون آن را فراهم میآورد. در دوقطبیهای دائمی ساختار مولکولها دو به شکلی است که بهصورت طبیعی توزیع بار الکترونی آن میشود. این امر به ایجاد قطب مثبت و منفی بر روی مولکول های مولکولها دو مولخولها می است که بیدارد و همواره میتواند با محیط پیرامون خود برهمکنش داشته باشند. مولکولها دو مهم ترین مولکول قطبی هست دو می می می می است که می توزیع بار میترین داشته باشند. مولکول ها دو

از آنجا که نیروهای بین مولکولی ماهیت الکتریکی دارند، بسیار کوتاه برد هستند؛ یعنی فقط در شرایطی وجود دارند که فاصلهٔ بین مولکولها یا یونها به اندازهٔ کافی کوتاه باشد. این نیروها در مقیاسهای بزرگ، یعنی هنگامی که تعداد بسیار زیادی از ذرات با هم برهمکنش دارند، بسیار تأثیرگذارند و بسیاری از خواص ماده را تعیین میکنند.

## 🗇 مواد بلورین و مواد بیشکل

مواد جامد را میتوان به دو گروه بیشکل <sup>۱</sup> و بلورین <sup>۲</sup> تقسیم کرد. چیدمان اتمها یا مولکولهای سازنده در مواد بیشکل از هیچ نظم خاصی پیروی نمیکند؛ درحالیکه مواد بلورین از کنار هم قرار گرفتن اتمها یا مولکولها بهصورت منظم تشکیل شدهاند. نظم موجود در این مواد دارای دو شرط اصلی است؛ دورهای <sup>۲</sup> (تکرارشونده) و بلند برد است و با گسترش در هر سه جهت فضایی، ساختاری تعریفشده ایجاد میکند که به آن بلور <sup>1</sup> میگویند. در هر بلور به کوچکترین واحد متشکل از اتمها یا مولکولهای سازنده، که نظم ساختاری بلور را در خود دارد و الگویی تکرارشونده است، سلول واحد<sup>6</sup> گفته میشود. براساس این تعریف، هر مادهٔ جامد بلورین با تکرار سلول واحد آن در سه بُعد شکل میگیرد؛ درنتیجه، فضا از تکرار سلولهای واحد پر میشود و شبکهٔ بلورین <sup>2</sup> را پدید میآورد. شاخهای از علم مواد، که ساختار بلوری مواد را بررسی میکند، بلورشناسی <sup>۷</sup> نامیده میشود. بنا بر مطالعات بلورشناسی، همهٔ مواد بلورین، براساس تنوع شکل هندسی سلول واحد، در هفت نوع دستگاه بلوری طبقهبندی میشوند. این هفت دستگاه عبارتاند از مکعبی <sup>۸</sup>، چهارگوشه <sup>۴</sup>، ششگوشه <sup>۱۰</sup>، راست لوزی <sup>۱۱</sup>، لوزی پهن<sup>۲۱</sup>، تکشیب<sup>۳۱</sup> و سه شیب<sup>۱۱</sup>. با قرار دادن اتمها در این هفت دستگاه، چهارده شبکهٔ بلوری به دست میآید. این شبکههای بلوری چهارده گانه، به افتخار کشف علمی براوه در ۱۸۴۸ میلادی، به شبکههای براوه<sup>۱۵</sup> موروناند (شکل ۲). قرار گیری انواع اتمها یا مولکولها در این شبکههای بلوری سبب ایجاد بلورهای متنوع با خواص متمایز میشود.



- 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

گ<u>خت</u>ال اول مواد پیرامون م

مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك

回 مشخصههای شبکه بلور



هر سلول واحد با شش عدد مشخصه توصیف میشود. این اعداد شش گانه با نام ثابتهای شبکه<sup>۱</sup> به اعداد مشخصهٔ یک سلول واحد معروفاند و در دو گروه جای می گیرند. گروه اول به طول اضلاع اصلی سلول واحد مربوط است و گروه دوم زاویهٔ بین این ضلعها را نشان میدهد. شکل ۳ اندازهٔ سه ضلع سازنده (a و d و c) و زاویهٔ بین هر دو ضلع سازنده ( $\alpha = \alpha \neq \beta \neq \alpha$ ) را نشان میدهد. در شبکهٔ براوهٔ مکعبی، اندازه ضلعها با یکدیگر برابرند و زاویهٔ بین آنها ۹۰ درجه است. در شبکهٔ سهشیب، اندازه هیچکدام از سه ضلع برابر نیست و زاویهٔ بین مو دو خلع ساز دارد ( $\alpha = \alpha \neq \beta \neq \gamma$ ) را نشان میدهد. در شبکهٔ براوهٔ مکعبی، اندازه های با یکدیگر از سه ضلع برابر نیست و زاویهٔ بین هر دو ضلع با زاویههای دیگر تفاوت دارد از سه ضلع برابر نیست و زاویهٔ بین هر دو ضلع با زاویههای دیگر تفاوت دارد ( $\alpha \neq \alpha \neq 0$ )

در برخی از این چهارده شکل، نهتنها در گوشهها بلکه در مرکز و مرکز سطوح و قاعدهها هم نقاطی دیده میشود. شکلهایی که فقط در گوشهها نقطه دارند، به بلورهای ساده موسوماند. گروه دوم، شکلهای مرکزدار<sup>۲</sup> هستند که از قرارگرفتن یک نقطه در مرکز شکل ساده ایجاد میشوند. گروه سوم، شکلهایی با قاعدههای مرکزدار<sup>۲</sup> هستند که در مرکز دو قاعدهٔ شکل ساده، یک نقطه قرار دارد. گروه چهارم، شکلهایی با سطوح مرکزدار<sup>۴</sup> هستند که در تمام مراکز سطوح جانبی شکل ساده، یک نقطه قرار گرفته است.

منظور از نقطه در شکلهای بالا، محل قرار گرفتن اجزا در بلورهاست؛ از قبیل اتمها، مولکولها و یونها. نحوهٔ قرار گرفتن این اجزا نظم و ترتیب بیانشده در بالا را به وجود میآورد. به بیانی دیگر، باید گفت که مرکز اتمهای سازندهٔ سلول واحد بر این نقاط منطبق میشوند. سه شبکهٔ مهم، که بیشتر ساختارهای بلوری در این آنها متبلور میشوند، عبارتاند از مکعبی مرکزدار (BCC)<sup>6</sup>، مکعبی سطوح مرکزدار (FCC)<sup>7</sup> و شش گوشه<sup>7</sup>. شکل ۴ نمایش سهبعدی از سه ساختار بلوری مکعبی با سه روش مختلف را نشان میدهد.

برای بیان مشخصههای فضایی یک سلول واحد علاوه بر ثابتهای شبکه، سه مشخصهٔ دیگر هم وجود دارد که عبارتاند از تعداد اتمهای موجود در یک سلول واحد، تعداد همسایگان یک اتم در یک سلول واحد (عدد همسایگی<sup>^</sup>) و جزئی از حجم سلول واحد که اتمها آن را اشغال کردهاند (ضریب فشردگی<sup>°</sup> اتمی). برای بیان این مشخصهها از سادهترین سلول واحد ممکن استفاده می کنیم. ساختار سلول واحد مکعبی ساده<sup>۱۰</sup> را در نظر بگیرید (شکل ۴).

- 1- Lattice constants
- 2- Body centered
- 3- Base centered
- 4- Face centered
- 5- Body centered cubic
- 6- Face centered cubic
- 7- Hexagonal
- 8- Coordination Number (CN)
- 9- Atomic Packing Factor (APF)
- 10- Simple cubic (SC)

يحسل إلأل

بواد پيرامون ما



همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، در ساختار مکعبی ساده، هر اتم با شش اتم دیگر همسایه است؛ سه اتم در سه گوشهٔ مجاور همان سلول واحد و سه اتم در سلول های دیگر. این نشان می دهد عدد همسایگی این ساختار برابر با شش است.

ضریب فشردگی<sup>۱</sup> اتمی مشخصهٔ دیگری است که در بررسی ساختارهای بلوری مورد توجه قرار می گیرد. ضریب فشردگی 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 (رابطهٔ ۱).

در ادامه، این مشخصهها را ابتدا در سادهترین سلول واحد (مکعبی ساده) و سپس، در سه ساختار بلوری مهم (مکعبی مرکز پر، مکعبی مرکز وجوه پر و شش گوشه فشرده) بررسی میکنیم.



مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك

**مکعبی ساده:** ساختار سلول واحد مکعبی ساده را در شکل ۵ در نظر بگیرید. هشت اتم در هشت گوشهٔ مکعب قرار دراند ولی به طور کامل داخل سلول واحد مکعبی نیستند. اگر یکی از این هشت اتم را در نظر بگیریم، متوجه می شویم که این اتم بین سلول واحد نشان داده شده و با هفت سلول واحد دیگر، که در آن گوشه با هم همسایه اند، مشتر ک است. پس می توان گفت فقط  $\frac{1}{h}$  آن اتم متعلق به سلول واحد نشان داده شده است؛ در نتیجه تعداد اتمهای سازندهٔ است. پس می توان گفت فقط  $\frac{1}{h}$  آن اتم متعلق به سلول واحد نیگر، که در آن گوشه با هم همسایه اند، مشتر ک است. پس می توان گفت فقط  $\frac{1}{h}$  آن اتم متعلق به سلول واحد نشان داده شده است؛ در نتیجه تعداد اتمهای سازندهٔ یک واحد شبکهٔ مکعبی ساده برابر  $1 = \frac{1}{h} \times h$  است. همچنین، هر اتم در این ساختار، با شش اتم دیگر همسایه است؛ سه اتم در سه گوشهٔ مجاور در همان سلول واحد و سه اتم در سلولهای دیگر. از این رو، عدد همسایگی این ساختار به ساتم رابر شن است. همان طول واحد و سه اتم در سلولهای دیگر. از این رو، عدد همسایگی این ساختار بر شن است. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود در ساختار مکعبی، اتمهای مجاور روی اضلاع مکعب بر هم مماس اند. با فرض این که در این رابر شما اتم دیگر همسایه است؛ می اتم در سلول واحد و سه اتم در سلولهای دیگر. از این رو، عدد همسایگی این ساختار میه اتم در ساز بین واحد شمان داد (می این می محود می شود در ساختار مکعبی، اتمهای مجاور روی اضلاع مکعب بر هم مراس اند. با فرض اینکه در این رابطه R شعاع کرهٔ اتم باشد (شکل اتم را کروی کامل فرض کردیم.)، اندازهٔ ضلع مکعب سلول واحد دو برابر اندازهٔ شعاع هر اتم است (a - 1)؛ پس طبق رابطهٔ ۱، ضریب فشردگی ۲۰/۵ محاسبه می شود:

(۲) 
$$\frac{1 \times \frac{4}{3} \pi R^3}{(2R)^3} = 0.52$$
 (۲) ماختار سادهٔ مکعبی

مکعبی مرکز پر (BCC): برای بهدستآوردن تعداد اتمهای سازندهٔ یک واحد شبکهٔ مکعبی مرکزپر میتوان تصور کرد که سلول واحد مکعبی مرکزپر همان سلول واحد مکعبی ساده است که در مرکز آن یک اتم قرار داده شده است (شکل ۶). پس تعداد اتمهای سازندهٔ یک واحد شبکهٔ مکعبی مرکزپر یک اتم بیشتر از مکعبی ساده و برابر دو اتم است. همچنین، در این ساختار هر اتم با هشت اتم دیگر همسایه است؛ برای مثال؛ اتم مرکزی را در نظر بگیرید که هشت اتم گوشهای آن با یکدیگر همسایهاند. پس عدد همسایگی ساختار مکعبی مرکزپر برابر هشت است.



همانطور که در شکل ۶ می ینید، در ساختار مکعبی مرکزیر، اتمی که در مرکز قرار دارد بر هشت اتم گوشه مماس است؛ درنتیجه، قطر مکعب چهار برابر شعاع اتم است. می دانیم که قطر مکعب  $\sqrt[3]{v}$  برابر ضلع مکعب است، بنابراین a = fr آلاعات و با استفاده از رابطهٔ ۱، ضریب فشردگی سلول واحد مکعبی مرکزیر ۰/۶۸ محاسبه می شود:

(۳) 
$$\frac{2 \times \frac{4}{3} \pi (R)^3}{(\frac{4R}{\sqrt{3}})^3} = 0.68$$
 (۳)

محسل الرال مواد پيرامون ما بسیاری از فلزات شامل فلزات قلیایی، مانند سدیم و بسیاری از عناصر واسطه، مانند آهن در دمای محیط ساختار مكعبى مركزير دارند.



مكعبى مركز وجوه پر (FCC): اين ساختار، در مقايسه با ساختار مکعبی ساده، شش اتم در مرکز شش وجه مکعب بیشتر دارد. درواقع، فقط نیمی از هر اتم متعلق به سلول واحد مکعبی مرکز وجوه پر است و نیم دیگر آنها به سلولهای واحد همسایه تعلق دارد. با شمردن اتمهای متعلق به این ساختار، تعداد اتمهای سازندهٔ یک واحد شبکهٔ مکعبی مرکز وجوه پر برابر با چهار خواهد بود شکل۷:ساختاربلوری مکعبی مرکز وجه پر ونحوهٔ قرارگیری آتم ها در همسایگی هم (۴= ( 🕂 ×۴ )+ ۱). برای محاسبهٔ عدد همسایگی این ساختار، اتم

مرکزی یکی از وجهها را در نظر بگیرید. این اتم با چهار اتم گوشهای، که در صفحهٔ وجه موردنظر قرار دارند، همسایه است. علاوه بر این، چهار اتم مرکزی چهار وجه مجاور آن وجه هم با این اتم همسایهاند. اگر سلول مجاور با وجهی که این اتم در آن قرار دارد را رسم کنیم، میبینیم که در سلول همسایه هم، چهار اتم مرکزی چهار وجهه مجاور با این اتم همسایهاند. پس درمجموع، هر اتم از این ساختار با ۱۲ اتم دیگر همسایه است. با تأمل در شکل ۷، میتوانید عدد همسایگی این ساختار بلوری را به شکل سادهتر محاسبه کنید.

برای محاسبهٔ ضریب فشردگی ساختار مکعبی مرکز وجه پر، شکل ۸ را مشاهده کنید. اتمهایی که در مرکز وجوه قرار دارند، با چهار اتم گوشهٔ هر وجه مماساند؛ درنتيجه، قطر هر وجه مكعب چهار برابر شعاع كرهٔ اتم است، يعني v a=۴R. ازاین٫و، ضریب فشردگی این ساختار ۷۴. به دست میآید:

(\*) 
$$\frac{4 \times \frac{4}{3} \pi (R)^3}{\left(\frac{4R}{\sqrt{2}}\right)^3} = 0.74$$
 (\*)

بسیاری از فلزات، مانند آلومینیم، طلا، مس، نیکل و سرب ساختار بلوری مکعبی مرکز وجه پر دارند.



مواد ييرامون م فحسال الوله

مفاهيم اوليه فناوري نانو و كاربردهاي آن در فيزيك

شش گوشهٔ فشرده (هگزاگونال فشرده): ساختار شش گوشهٔ فشرده (HCP)<sup>۱</sup> معروف ترین ساختار بلورین است. همان طور که در شکل ۹ مشاهده می کنید، این ساختار سه لایه دارد؛ لایهٔ زیرین و لایهٔ بالایی هر کدام، هفت اتم دارند که شش اتم آنها در رئوس یک شش ضلعی و اتم هفتم در مرکز قرار دارد. در لایهٔ وسط، سه اتم در میان قسمت فرورفتهٔ مثلثی لایه های بالایی و پایینی واقع شده است. می توان این ساختار را حاصل کنار هم قرار گرفتن سه سلول واحد راست لوزی مرکز پر<sup>۲</sup> دانست.

همانطور که در شکل(۹-آ) میبینید، تعداد اتمهای سازندهٔ یک واحد شبکهٔ شش گوشه فشرده برابر با شش است: در گوشههای ششضلعی بالا و پایین، دوازده اتم قرار دارند که از هرکدام از آنها، فقط <u>۱</u> کل اتم به سلول واحد موردنظر تعلق دارد که درمجموع، برابر دو اتم میشود. نیمی از هر یک از دو اتمی که در مرکز ششضلعیهای بالا و پایین قرار دارند، متعلق به سلول واحد موردنظر است. سه اتم هم بهطورکامل داخل ساختار واقع شدهاند.



شکل ۹: (آ) نمایش سهم هر اتم در سلول واحد ساختار HCP، (ب) و (پ) نحوهٔ قرار گیری اتم ها در ساختار HCP

برای محاسبهٔ عدد همسایگی ساختار ششگوشه فشرده، شکل ۱۰ را مشاهده کنید. اتم مرکزی را، که در یکی از شش ضلعی های سلول واحد قرار دارد، در نظر بگیرید (اتم قرمز رنگ در شکل ۱۰). شش اتم موجود در گوشه های شش ضلعی، این اتم را محصور کردهاند. با تکرار سلول واحد در بالا و پایین، مجاورت این اتم با سه اتم لایهٔ میانی از بالا و پایین مشهود است. بر این اساس، عدد همسایگی این ساختار دوازده به دست می آید. ضریب فشردگی اتم ها<sup>۳</sup> در ساختار شش گوشه فشرده مانند ساختار مکعبی مرکز وجوه پر برابر ۱۷۴۴ است. برخی از فلزات معمول، مانند منیزیم، تیتانیوم، بریلیم، کادمیوم و روی ساختار بلوری شش گوشهٔ فشرده دارند.



1- Hexagonal Closed Packed (HCP)

2- Body centered orthorhombic

💿 صفحه های بلوری

صفحههای بلوری<sup>۲</sup>، صفحههایی مجازیاندکه حداقل از سه نقطهٔ غیرهم<sub>ا</sub>راستا در شبکهٔ براوه عبور میکنند و محل تقاطعشان با نقاط، نظم تعریفشده و تکرارپذیری را در شبکهٔ بلور به وجود میآورد. در علم بلورشناسی، این صفحات با هدف توصیف بهتر اجزای یک شبکهٔ بلوری فرض شدهاند. در شکل ۱۱ سه صفحه از انواع صفحههای بلوری ممکن برای ساختار بلوری مکعبی ساده نشان داده شده است.



شکل ۱۱: سه صفحهٔ بلوری از میان انواع صفحههای بلوری برای ساختار بلوری مکعبی ساده

می توان همهٔ صفحههای بلوری مشابه را با گروهی از اعداد صحیح، که شاخصهای میلر <sup>۱</sup> نامیده می شوند، توصیف کرد. به طور معمول، هر دستهٔ مشخص از صفحههای بلوری (صفحههای موازی که همارز هستند) را با استفاده از سه عدد صحیح k ،h و l نشان می دهند که به شکل (hkl) نوشته می شود. در مباحث بلور شناسی، هر صفحه با شاخص میلر معرفی می شود. شاخص میلر در واقع، نام و نشان یک صفحهٔ بلوری است. ساده ترین راه برای به دست آوردن شاخص های



میلر صفحههای بلوری، تعیین محل برخورد این صفحهها با محورهای دستگاه مختصاتی است که سلول واحد شبکهٔ بلوری موردمطالعه بر آن منطبق است. در چنین دستگاه مختصاتی، که دراصطلاح دستگاه مختصات بلورشناسی<sup>7</sup> نامیده میشود، سه بردار یکهٔ <sub>1</sub>a، <sub>2</sub>a و <sub>3</sub>a بهترتیب، در راستای محورهای x، y و z تعریف میشوند. طول آنها برابر طول ثابت شبکهٔ همراستای آنهاست و زاویهٔ میان بردارها برابر زاویهٔ مشخصهٔ سلول واحد

شکل ۱۲: (آ) شبکهٔ بلوری مکعبی ساده یا ثابت شبکهٔ ۵ در دستگاه مختصات بلورشناسی و (ب) مختصات محل قرار گیری اترهای یک بلور شبکهٔ مکعبی ساده در این دستگاه

است. شکل ۱۲ تصویری از دستگاه مختصات بلورشناسی را نشان میدهد که به شبکهٔ بلوری مکعبی ساده و مختصات محل قرارگیری اتمهای یک بلور شبکهٔ مکعبی ساده در این دستگاه تعلق دارد.

شاخصهای میلر یک صفحهٔ بلوری برابر است با نقطهٔ مقابل محل قطع محورهای دستگاه مختصات بلورشناسی توسط آن صفحه؛ بهاینصورت که معکوس طول در محل قطع محور x برابر h معکوس عرض در محل قطع محور y برابر kو معکوس ارتفاع در محل قطع محور z برابر l است. اگر یک صفحه موازی یک محور باشد، محل قطع بینهایت فرض می شود و معکوس بینهایت هم صفر است. شکل (۱۳– آ) صفحهای را نشان می دهد که هر سه محور دستگاه مختصات بلورشناسی را در محل قرار گیری اتمهای شبکهٔ مکعبی ساده قطع می کند. مختصات محل را می توان به راحتی و با کمک

1- Lattice plane

2- Miller indices

3- Crystallographic systems

محدل اول مواد ييرامون م شکل (۱۲– ب) تعیین کرد. طول، عرض و ارتفاع محل قطع محورهای مختصات برابر با یک است؛ درنتیجه شاخص میلر این صفحه برابر (۱۱۱) است. شکل (۱۳– ب) صفحهای را نشان می دهد که طول و عرض محل قطع محورهای مختصات آن برابر یک است؛ درحالی که این صفحه موازی محور z بوده و در هیچ نقطهای این محور را قطع نمی کند؛ ازاینرو، شاخص میلر این صفحه (۱۱۰) است. به همین ترتیب، شاخص میلر صفحهٔ مشخص شده در شکل (۱۳– پ) عدد (۱۰۰) است. این محور را قطع نمی کند؛ ازاینرو، شاخص میلر این صفحه می این محور و با یک است؛ در شکل (۱۳ – پ) مشخص میلر منه در شکل (۱۳ – پ) مفحه موازی محور z بوده و در هیچ نقطهای این محور را قطع نمی کند؛ ازاینرو، شاخص میلر این صفحه (۱۱۰) است. به مین ترتیب، شاخص میلر صفحهٔ مشخص شده در شکل (۱۳ – پ) عدد (۱۰۰) است. لازم به ذکر است که در یک دستگاه مختصات بلورشناسی، تمامی صفحات موازی همارزند و با یک منخص میلر مشخص می شوند.



شکل ۱۳: سه صفحهٔ بلوری (۱۱۱)، (۱۱۰) و (۱۰۰) در یک بلور مکعبی ساده

ممکن است صفحهٔ بلوری محور مختصات را در نیمهٔ منفی قطع کند. در چنین حالتی، مؤلفهٔ مربوط به این عدد منفی با گذاشتن خط تیره بر روی معکوس آن بیان میشود؛ برای مثال اگر صفحهای دو محور افقی و عمودی (x و z) را در یک

> و محور عرضی (۷) را در منفی یک قطع کند، شاخص میلر آن برابر (۱۱۱) خواهد بود. در مواردی که محل قطع یک صفحه کمتر از یک باشد (عددی کسری)، در شاخص میلر این صفحه اعدادی بزرگتر از یک وجود خواهند داشت؛ برای مثال صفحهای که شاخص میلر آن (۲۱۱) است، محور x را در نقطهٔ ۵/۰ و محور Y و z را در نقطهٔ ۱ قطع میکند. این شاخص میتواند در شبکهٔ بلوری مکعبی مرکزپر، به صفحهای منسوب باشد که دربردارندهٔ دو اتم مستقر بر روی محورهای Y و z و اتم موجود در مرکز سلول واحد است (شکل ۱۴).

دستگاه مختصات بلورشناسی برای ساختارهای براوه با قاعدهٔ شش ضلعی، در مقایسه با ساختارهای دارای قاعدهٔ چهارضلعی، پیچیدگی بیشتری دارد. این

دستگاههای مختصات چهار محور دارند؛ ازاینرو، شاخصهای میلر برای ساختارهای بلوری دارای قاعدهٔ ششضلعی چهار مؤلفه دارد. در این دستگاه مختصات، سه محور  $a_1$   $a_2$  و  $a_3$  در یک صفحه قرار دارند و با یکدیگر زاویهٔ <sup>٥</sup>۲۲ می می سازند و محور c عمود بر صفحه ای است که سه محور دیگر در آن قرار گرفته اند. شاخص میلر در این دستگاه به شکل (hkil) نشان داده می شود و این مؤلفه ها به تر تیب، از چپ به راست متناظر با معکوس محل قطع صفحهٔ بلوری با محورهای  $a_1$   $a_2$   $a_3$   $a_2$  هاری معادی است که سه محور دیگر در آن قرار گرفته اند. شاخص میلر در این دستگاه به شکل (hkil) نشان داده می شود و این مؤلفه ها به تر تیب، از چپ به راست متناظر با معکوس محل قطع صفحهٔ بلوری با محورهای  $a_1$   $a_1$   $a_2$   $a_2$   $a_3$   $a_4$   $a_5$   $a_6$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_3$   $a_4$   $a_3$   $a_4$   $a_5$   $a_5$   $a_6$   $a_6$   $a_6$   $a_1$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_3$   $a_1$   $a_2$   $a_3$   $a_4$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_3$   $a_1$   $a_2$   $a_3$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_3$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_3$   $a_4$   $a_1$   $a_2$   $a_2$   $a_1$   $a_3$   $a_4$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_3$   $a_4$   $a_1$   $a_2$   $a_2$   $a_1$   $a_3$   $a_4$   $a_1$   $a_3$   $a_4$   $a_4$   $a_4$   $a_4$   $a_4$   $a_4$   $a_4$   $a_4$   $a_5$   $a_6$   $a_6$   $a_1$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_3$   $a_4$   $a_4$   $a_5$   $a_6$   $a_1$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_3$   $a_1$   $a_2$   $a_3$   $a_3$   $a_4$   $a_4$   $a_4$   $a_4$   $a_5$   $a_6$   $a_1$   $a_1$   $a_1$   $a_2$   $a_3$   $a_4$   $a_4$   $a_5$   $a_6$   $a_1$   $a_1$   $a_2$   $a_3$   $a_4$   $a_4$   $a_5$   $a_6$   $a_1$   $a_1$   $a_2$   $a_3$   $a_4$   $a_4$   $a_4$   $a_5$   $a_6$   $a_1$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_1$   $a_1$   $a_1$   $a_1$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_1$   $a_1$   $a_2$   $a_1$   $a_1$  گتیل ارال بواد پیرامون ما





### 🚸 🛛 تقسیمبندی مواد از نظر اندازه

بر اساس آنچه تاکنون آموختهاید، بخش مهمی از خواص مواد به مقدار مادهٔ مورد بررسی بستگی ندارند. این خواص به خواص شدتی<sup>۱</sup> معروفاند؛ برای مثال، با بریدن یک ورقهٔ طلا به چند قطعه، تغییری در ویژگیهای اصلی آن ایجاد نمی شود؛ رنگش ثابت می ماند، ظرفیت گرمایی ویژهٔ آن تغییری نمی کند و رسانایی ویژهٔ الکتریکی هر قطعه با رسانایی ویژهٔ الکتریکی ورقهٔ طلای اولیه یکسان است.

باور افراد بر این است که با کوچککردن ابعاد یک ماده، تغییری در خواص شدتی آن صورت نمی گیرد اما امروزه مشخص شده است که با کوچکشدن ابعاد ماده تا اندازهٔ نانومتری، خواص شدتی آن هم تغییر می کند؛ برای مثال اگر ذرات بسیار کوچکی از طلا به ابعاد حدود چند نانومتر (nm) تهیه کنیم، رنگ این ذرات دیگر طلایی نیستند. شاید در نگاه اول این پدیده بسیار عجیب به نظر برسد؛ زیرا کوچکترکردن اندازهٔ ذرات یک ماده تغییری ایستند. شاید در نگاه اول این پدیده بسیار عجیب به نظر برسد؛ زیرا کوچکترکردن اندازهٔ ذرات یک ماده تغییری اندازهٔ مرا اگر ذرات بسیار کوچکی از طلا به ابعاد حدود چند نانومتر (nm) تهیه کنیم، رنگ این ذرات دیگر طلایی نیستند. شاید در نگاه اول این پدیده بسیار عجیب به نظر برسد؛ زیرا کوچکترکردن اندازهٔ ذرات یک ماده تغییری اندازهٔ مواد به ابعادی کمتر از مان می مانند رنگ آن تأثیر بگذارد ولی مشاهدات نشان داده است که معمولاً، با کاهش اندازهٔ مواد به ابعادی کمتر از nm در می از می مشاهدات نشان داده است که معمولاً، با کاهش می اندازهٔ مواد به ابعادی کمتر از nm می می مواد بولی مشاهدات نشان داده است که معمولاً، با کاهش می اندازهٔ مواد به ایک روی ویژگیهای مانند رنگ آن تأثیر بگذارد ولی مشاهدات نشان داده است که معمولاً، با کاهش می اندازهٔ مواد به ابعادی کمتر از nm داده است که معمولاً، با کاهش می شود. علت بروز این پدیده در ابعاد نانومتر در بخشهای پیشرو بررسی خواهد شد. این تغییرات خواصی، که ناشی می شود. علت بروز این پدیده در ابعاد نانومتر در بخشهای پیشرو بررسی خواهد شد. این تغییرات خواصی، که ناشی می شود. علت بروز این بیده در ابعاد نانومتر در بخشهای پیشرو براسی اندازهٔ آنها در ابعاد نانو است.



آن در في

گتــل ارول مواد پيرامون م

مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك

1- Intensive properties

کشف تغییرات قابل توجهی که در خواص مواد در ابعاد نانو رخ میدهد سبب شده است که در سالهای اخیر، مواد جامد در دو گروه اصلی تودهای <sup>۱</sup> و نانویی <sup>۲</sup> تقسیم.بندی شوند.

بر این اساس، نانوماده به مادهای گفته میشود که حداقل یکی از ابعاد آن (طول، عرض و ارتفاع) در اندازهٔ نانو باشد؛ به این معنی که ابعاد آن در محدودهٔ nm ۱۰۰ – ۱ قرار بگیرد یا از اجزای مؤثری با این اندازه تشکیل شده باشد. لازم به ذکر است که اگرچه همهٔ اتمها و بسیاری از مولکولهای معمولی اندازهای بسیار کوچک دارند (کمتر از nm ۱)، در دستهٔ نانومواد قرار نمی گیرند. در شکل ۱۶ اندازه برخی از مواد شناخته شده نسبت به ابعاد نانو متری مقایسه شده است. از زمانهای قدیم، انسانها از نانومواد برای درمان (طب سنتی چینی) و تولید رنگها (روم باستان) استفاده می کردند. همچنین، نانوموادی مانند جوهر رنگارنگ و جادویی، که از نانوذرات<sup>۲</sup> کلوئیدی<sup>†</sup> ساخته شده بود، در کارهای هنری استفاده میشد؛ برای مثال در جام لیکرگوس<sup>6</sup> (شکل ۱۷) و شیشههای رنگی کوچک و بزرگ استفاده شده در تزئین کلیساها، ردپایی از نانوذرات فلزی وجود دارد. بااین حال، ما نمیدانیم که آیا در آن دوران انسان علم دقیقی به ماهیت این نانومواد و خواص منحصربه فرد آنها داشته است یا خیر!



شکل ۱۷: جام لیکر گوس در زیر نور معمولی به رنگ سبز یشمی و درصورت تابانده شدن نور از داخل آن، قرمز یاقوتی دیده میشود. شیشهٔ جام لیکر گوس حاوی مقدار کمی ذرات نقره و طلا با قطری در حدود nm ۵۰ (کمتر از یکهزارم یک دانهٔ نمک) است [۱]

# 🔅 🛛 علم و فناوری نانو

پس از معرفی نانومواد، اکنون زمان آن رسیده است تا تعریف دقیقی از علم نانو ٔ ارائه دهیم و مفهوم فناوری نانو ٔ را بیان کنیم. رایج ترین تعریف علم نانو به این صورت بیان میشود:

علم نانو به مطالعهٔ پدیدهها در ابعاد نانو میپردازد؛ از سویی، میکوشد خواص مواد را در این ابعاد کشف کند و از سوی دیگر، با خلق نظریات جدید و بهره گیری از نظریات موجود به دنبال توجیه و درک این خواص نوظهور است. دانشمندان علم نانو همواره با تبیین اصول حاکم بر حوزهٔ نانو بهرهبرداری از خواص نانومواد را برای مهندسان نانو ممکن میسازند. به بیان سادهتر، علم نانو مانند رشتههای علوم پایه، همچون فیزیک و شیمی، بیشتر به بررسی مباحث نظری و بنیادی میپردازد. هدف این علم توجیه پدیدههای موجود در دنیای نانو و شناخت جامع آنهاست. پس از درک قوانین و اصول

- 2- Nanomaterial
- 3- Nanoparticle

۴- کلوئید (colloid) به ذراتی با اندازهای در حدود nm ۱ الی nm ۲ گفته میشود که بهصورت همگن و پایدار از یک مایع پخش شدهاند؛ برای مثال شیر یک کلوئید است. ذرات معلق در محیط مایع میتوانند مایع (مانند قطرات بسیار کوچک روغن پخششده در آب) و یا جامد باشند.

- 5- Lycurgus cup
- 6- Nanoscience
- 7- Nanotechnology

مواد پيرامون ما

<sup>1-</sup> Bulk

حاکم بر دنیای نانو، نیاز است تا مهندسان نانو این اصول را در تولید محصولات نوین بر پایهٔ خواص نوظهور مواد در ابعاد نانو به کار برند و این محصولات را روانهٔ بازار کنند. بر این اساس، فناوری نانو علم و فن تولید محصولاتی است که از خواص مواد در ابعاد نانو بهره می برند. در تعریف جامع، می توان فناوری نانو را چنین بیان معرفی کرد: فناوری نانو درک صحیح و کاربردی از خواص نوظهور ماده در ابعاد نانو در حوزهٔ علوم مهندسی است؛ به منظور تولید محصولات جدید و کارآمدتر از آن چیزی که با فرایندهای متداول در دسترساند.

بهعبارت دیگر، فناوری نانو فناوری طراحی و ساخت تجهیزات و مواد با ابعاد نانو یا دستکاری کنترل شدهٔ ساختار مواد بادقت چینش اتمی خارجی است. محصولات تولیدشده با این فناوری، به سبب پدیدههای متفاوتی که در ابعاد نانو پدیدار میشوند، خواص و عملکرد منحصربهفرد و متفاوتی با مواد در ابعاد معمولی دارند.

#### 🚸 🛛 تقسیمبندی نانومواد بر اساس ابعاد

همهٔ مواد و اجسام پیرامون ما دارای سه بعد طول، عرض و ارتفاعاند. در نانومواد حداقل یکی از این ابعاد سه گانه در محدودهٔ نانو قرار دارد؛ ازاینرو، دستهبندی نانومواد بر اساس تعداد ابعاد نانویی آنها انجام میشود؛ نانوموادی که هر سه بعد آنها در محدودهٔ کمتر از نانو باشد، نانومواد صفربعدی؛ نانوموادی که دو بعد آنها در محدودهٔ نانو باشد، نانومواد یکبعدی و آنهایی که فقط یک بعدشان در محدودهٔ نانو قرار دارد، نانومواد دوبعدی نامیده میشوند. درواقع، در این تقسیمبندی، از ابعاد نانویی در مقابل ابعاد دیگر صرفنظر میشود.

در دستهبندی نانومواد، گروه دیگری به نام نانومواد سهبعدی هم وجود دارند. این نانومواد هیچ بعدی در محدودهٔ نانو ندارند و در تمام ابعاد سهگانه دارای ابعادی بهمراتب بزرگتر از محدودهٔ نانوموادند. آنچه مواد تودهای را به نانومادهٔ سهبعدی تبدیل میکند، وجود اجزای سازندهٔ نانویی است که بهصورت مستقیم در خواص آنها دخیلاند؛ برای مثال مادهٔ مرکبی<sup>1</sup> که جزء تقویت کنندهٔ آن نانومادهٔ یک بعدی یا صفر بعدی باشد، خود یک نانومادهٔ سهبعدی است؛ همچنین، پارچهای که به الیاف آن نانوذرات ضد باکتری افزوده شده است، نانومادهٔ سهبعدی به شمار میرود. علاوه بر اجزای نانویی، وجود خلل و فرج نانویی هم مادهٔ تودهای را به نانومادهٔ سهبعدی تبدیل می کند. شکل ۱۸ طرحی بسیار ساده از این ۴ گروه نانومواد را نشان میدهد. این دستهبندی علاوه بر اینکه نانومواد را از نظر ابعادی از هم جدا می کند، یک بعدی و دوبعدی در خواص الکتریکی، نوری، مغناطیسی و سطحی با یکدیگر تفاوتهای اساسی دارند و درنتیجه، کاربردهایشان هم متفاوت است.



گشتال اول مواد پیرامون م

مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك

۲۷

#### 🖲 نانومواد صغربعدي

نانومواد صفربعدی، معروفترین نانوساختارهای مورداستفادهاند و معمولاً، با نام نانوذرات شناخته میشوند. اندازهٔ نانوذرات در هر سه بعد، کوچکتر از ۱۰۰ nm است. این نانومواد بهصورت بیشکل یا بلورین و در انواع مختلف، ازجمله کروی، مکعبی، هرمی، پوسته کروی و هسته-پوسته <sup>(</sup> وجود دارند. شکل نانوذرات تابع روش تولید و شرایط محیطی تهیهٔ آنهاست و روی خواص و شیوهٔ کاربردشان تأثیر دارد. شکل ۱۹ طرحی از چند نانومادهٔ صفر بعدی را نشان میدهد.



معمولاً، تولید نانومواد صفربعدی نسبت به انواع دیگر سادهتر و ارزانتر است. همین امر سبب شده است که این نوع نانومواد در کنار خواص منحصربهفردشان، کاربرد گستردهای هم داشته باشند. شکل ۲۰ نشاندهندهٔ کاربردهای انواع نانوذرات یا نانوساختارهای صفربعدی است. خواص نانوذرات بهطورمستقیم، با اندازهٔ آنها در ارتباط است. درنتیجه، یکنواختی اندازهٔ ذرات تولیدشده اهمیت بسیار دارد. در واقع، میتوان گفت که مهمترین و دشوارترین بخش تولید نانومواد صفربعدی، دستیابی به توزیع یکنواختی از اندازهٔ ذرات است که دراصطلاح، توزیع باریک اندازهٔ ذرات نامیده میشود.

نقاط کوانتومی<sup>۲</sup> مهمترین نانومواد صفربعدیاند که ساختاری بلوری دارند و نیمهرسانا<sup>۳</sup> هستند. نقاط کوانتومی در دمای محیط معمولاً، اندازهای حدود nm (۱۰) دارند. انواع ترکیبهای نیمهرسانا، مانند CdSe، ZnSe و CdS از مواد قابل استفاده برای تولید نقاط کوانتومی به شمار میروند. امروزه، نقاط کوانتومی متنوعی معرفی شدهاند که در حوزههای مختلف استفاده میشوند. ویژگیهای نوری منحصربهفرد این نانومواد صفربعدی موجب کاربرد فراوان آنها در حوزههایی مانند الکترونیک، اپتیک و پزشکی شده است. هر نقطهٔ کوانتومی، بسته به اندازهٔ خود، طیف انرژی<sup>۲</sup> مجزایی دارد؛ بنابر این، پس از قرار گرفتن در معرض تابش نور، فقط میتواند یک طول موج مشخص تکرنگ را منتشر کند (شکل ۲۱– آ). از این رو، انتشار رنگهای مختلف نقاط کوانتومی در اندازههای مختلف و در شرایط یکسان تابش نور

<sup>1-</sup> Core-shell

<sup>2-</sup> Quantum Dot

۳- ویژگیهای مواد نیمهرسانا (semiconductor) در بخش مواد نیمهرسانا بهطورکامل تشریح شده است.

<sup>4-</sup> Energy Spectrum



فولرینها<sup>۱۰\*\*</sup> جذاب ترین نانومواد صفربعدی هستند که ساختارشان شبیه به یک توپ توخالی است و به همین دلیل به آنها Buckyball هم گفته میشود. اتمهای کربن در ساختار فولرینها، با پیوندهای اشتراکی در پنجضلعیها و ششضلعیهایی به هم وصل شدهاند و ساختاری قفس مانند تشکیل دادهاند. معروف ترین فولرین شناخته شده، فولرین C<sub>60</sub> است که بیست شش ضلعی و دوازده پنجضلعی دارد. فولرین C<sub>60</sub> خواص زیستی جالبی دارد و کاربرد آن در حوزههای درمانی و پزشکی، که از فناوری نانو و مواد نانوساختار استفاده می شود، رو به افزایش است (شکل ۲۵– ب).



#### 💿 نانومواد یک بعدی

نانومواد یکبعدی نانوساختارهاییاند که حتماً دو بعد آنها در محدودهٔ نانو قرار دارد و طول بعد دیگر حداقل، چند برابر دو بعد نانومتری است. نانومواد یکبعدی، با توجه به شکل ظاهری و نسبت طول به سطح مقطعشان، در چهار گروه

گتــل ارول مواد پيرامون ما

مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك

اصلی نانوالیاف<sup>ا</sup> ، نانوسیمها ً، نانومیلهها <sup>ً</sup> و نانولولهها ٰ قرار میگیرند. نسبت طول بعد بزرگتر به طول بعد کوچکتر، نسبت ابعادی یا نسبت منظر<sup>6</sup> نامیده میشود.

نانوسیم یا نانولیف، نانومادهای است که نسبت ابعادی آن بسیار بزرگ است (عددی در بازهٔ ۱۰۰ الی ۱۰۰۰). اگر نسبت ابعادی در محدودهٔ ۱۰ الی ۱۰۰ باشد، به آن نانومادهٔ یکبعدی، نانولوله گفته می شود و همان طور که از نام آن پیداست، نانولولهها نانومواد یک بعدی توخالی هستند (شکل ۲۲).



شکل ۲۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>6</sup> از (آ) نانوسیمهای سیلیکون [۵] (ب) نانوالیاف پلیاتیلن اکسید [۶] و (ب) نانولولههای تیتانیوم دیاکسید [۷]

خواص منحصربهفردی، مانند رسانایی الکتریکی، خواص نوری، مغناطیسی، حسگری و زیستی، باعث شده است که نانومواد یکبعدی کاربرد بسیاری در صنایع، ازجمله صنعت الکترونیک، داشته باشند. یکی از جالبترین ویژگی نانومواد یکبعدی، رفتار الکترونیکی و تغییرات هدایت الکتریکی آنهاست. یکبعدی بودن این نانوساختارها موجب شده است که حرکت الکترونها فقط در راستای محور آنها امکانپذیر باشد. در نانولولههای کربنی<sup>۷</sup> که یکی از مهمترین نانوساختارهای یکبعدی هستند، حرکت محوری الکترونها شکل خاصی به خود می گیرد که به آنترابرد بالستیک الکترون<sup>۸</sup> گفته می شود به این معنی که الکترونها می توانند بدون ممانعت فضایی در راستای محور نانولوله حرکت کنند. این امر موجب می شود که نانولولههای رسانا توانایی رسانش جریان الکتریکی بیشتری از فلز مس داشته باشند

بااین حال، برخی مشاهدات تجربی و مفاهیم فیزیکی حاکی از آن است که رسانش الکتریکی نانوسیمهای فلزی از حالت تودهای آنها کمتر است؛ زیرا اگر قطر سیم کمتر از طول پویش آزاد الکترونها<sup>\*</sup> باشد، الکترونها در مرزهای پیرامونی نانوسیمها پراکنده میشوند. در این شرایط، کاهش قطر نانوسیم به کاهش طول پویش آزاد الکترون منجر شده و کاهش رسانایی سیم را در پی خواهد داشت. عامل دیگری که خواص الکتریکی نانوسیمها را بسیار تحت تأثیر قرار می دهد، پدیدهای موسوم به اثر لبه <sup>۱۰</sup> است. این پدیده از اتمهایی که در سطح نانوسیمها حضور دارند نشأت می گیرد. اتمهای سطحی به طور کامل به اتمهای مجاور خود متصل نیستند و همین امر موجب میشود که رفتاری متفاوت با اتمهای

- 3- Nanorod
- 4- Nanotube
- 5- Aspect ratio

۶- انواع میکروسکوپهای مورد استفاده برای تصویربرداری از مواد مختلف، بهویژه مواد نانوساختار در بخش تصویربرداری از مواد بهطور کامل توضیح داده شده است.
7- Carbon nanotube (CNT)

8- Ballistic electron transport

۹- 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. 10- Edge effect

<sup>1-</sup> Nanofiber

<sup>2-</sup> Nanowire

درونی داشته باشند. همچنین، از آنجا که عامل بسیاری از عیوب ساختاری در نانوسیمها ست، این امر موجب کاهش رسانایی نانوسیمها نسبت به حالت تودهای آنها میشوند. بااین حال وجود اتمهای سطحی مزیتی برای نانوسیمها به شمار میرود و کاربرد ارزشمند استفاده بهعنوان نانو حسگر\* را برای نانوسیمها در پی دارد؛ به این تر تیب که با جذب اولین اتم یا مولکول بر سطح یک نانوسیم، رسانایی الکتریکی آن تغییر بسیار محسوسی می کند که با آشکارسازی آن، می توان به وجود گونهٔ جدید در محیط پی برد.

ویژگی مهم دیگر نانوسیمها این است که در صورت کاهش ابعاد سطح مقطع نانوسیم نیمهرسانا به کمتر از ۲۰ نانومتر، این نانوسیم اثرات کوانتومی<sup>۱،\*</sup> از خود نشان میدهد؛ ازاینرو به آن، سیم کوانتومی<sup>۲</sup> گفته میشود. رسانایی الکتریکی سیمهای کوانتومی کوانتیزه است؛ به این معنی که الکترونهایی که از نانوسیم عبور میکنند فقط مقدار پراکندهای از انرژی دارند.

نانوساختار یک بعدی پرکاربرد دیگر نانوالیاف<sup>\*</sup> است. الیاف به مواد جامدی گفته میشود که علاوه بر انعطاف پذیری و ظرافت بالا، طول بسیار بلندتری نسبت به قطرشان دارند (بیش از ۱۰۰۰ برابر). اگر قطر این الیاف به ابعاد نانومتری محدود گردد، این مواد نانوالیاف نامیده میشوند. امروزه نانوالیاف در بسیاری از حوزهها، بهویژه صنایع دارویی، مهندسی بافت<sup>\*</sup>، زخم پوششها، صنایع نساجی، ساخت فیلترها و فرایندهای جداسازی کاربرد دارند. کشسانی بالا (مقاومت کششی)، نسبت سطح به حجم بسیار بالا و طول بسیار زیاد از ویژگیهایی است که نانوالیاف را منحصربهفرد و کاربردی میسازد.

نانولولهها مهمترین نانومواد یکبعدیاند و از انواع نانولولهها، نانولولهٔ کربنی<sup>\*</sup> یکی از مشهورترین نانوساختارها به شمار میرود که ویژگیهای منحصربهفردی دارد. مهمترین ویژگیهای آن عبارتاند از استحکام بسیار بالا، رسانایی حرارتی بالا و هدایت الکتریکی. به موجب این خواص فوقالعاده، نانولولهٔ کربنی کاربرد وسیعی در زمینههای مختلف دارد.

ا نانومواد دوبعدی

نانومواد دوبعدی گروهی دیگر از نانوساختارها هستند که یک بعد آنها در ابعاد نانو قرار دارد و طول دو بعد دیگر چند برابر بزرگتر از طول بعد کوچکتر است. نانومواد دوبعدی دو نوع دارند؛ یا بهصورت مستقل در قالب نانوصفحهها<sup>۳</sup> یا نانوورقهها<sup>†</sup> هستند یا بهصورت لایهٔ نازک<sup>6</sup> روی زیرلایههای<sup><sup>7</sup> مختلف رشد داده میشوند.</sup>

لایههای نازک<sup>\*</sup> یا نانوپوششها با ضخامت نانومتری روی سطح مادهٔ دیگری به نام زیرلایه قرار میگیرند. مهمترین کاربرد نانولایهها ایجاد ویژگیهای سطحی موردنیاز مثل آبگریزی، مقاومت به خوردگی و مقاومت به سایش روی زیرلایه است.

لایههای نازک کاربرد گستردهای در ساخت ادوات الکترونیکی و تجهیزات نوری دارند. از آنها همچنین، بهعنوان پوششهایی با کاربردهای ضدسایش و ضدخوردگی نیز استفاده میشود. در نانولایهها هم، شبیه به نانوذرات و نانومواد یکبعدی، اگر ضخامت نانولایهٔ نیمهرسانا به اندازهای کم باشد که اثرات کوانتومی مشاهده شود، به آنها لایهٔ نازک چاه کوانتومی<sup>۷</sup> گفته میشود.

۱- اثرات کوانتومی (quantum effects)، این اثرات در بخش فیزیک حاکم بر مقیاس نانو معرفی شدهاند.

- 2- Quantum wire
- 3- Nanoplate
- 4- Nanosheet
- 5- Thin film
- 6- Substrate
- 7- Quantum well

دستهٔ دیگر نانومواد دوبعدی، نانوصفحهها و نانوورقهها هستند که مستقل از زیرلایهاند. از مهمترین نانوصفحهها میتوان به نانوصفحههای گرافن<sup>۱</sup> اشاره کرد. گرافن<sup>\*</sup> یک تکلایه از اتمهای کربن است که گرافیت از روی هم قرار گرافن به دلیل خواص منحصربهفردی مانند رسانایی الکتریکی بسیار زیاد، شفافیت، پایداری شیمیایی و استحکام مکانیکی بالا، بسیار موردتوجه دانشمندان قرار گرفته است.



شکل ۲۳: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانولایههای گرافیتی با ضخامت نانومتری تهیهشده از طریق لایهلایه کردن مغز مداد [۸]

#### 🖲 نانومواد سەبعدى

مواد سهبعدی نانوساختار یا نانومواد تودهای یا حجیم، دستهای از نانوموادند که ابعاد ظاهری بزرگتری از محدودهٔ تعریف فناوری نانو دارند. آنچه باعث میشود این گروه از مواد جزء نانومواد قرار بگیرند، این است که برخی از اجزای سازندهٔ آنها حداقل، یک بعد نانومتری دارد و یا دارای تخلخل نانومتری است. نانومواد سهبعدی بهطورکلی، شامل مواد نانوترکیب<sup>۲</sup> مواد نانومتخلخل<sup>۲</sup> (دارای حفرههای نانومقیاس) و مواد نانوبلوری<sup>۲</sup> یا نانومواد ریزدانه است.

**مواد نانو ترکیب**: مواد مرکب<sup>6</sup> ، موادیاند 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<sup>6</sup> موسوم است؛ جزء دوم، که دراصطلاح، تقویت کننده<sup>۲</sup> نامیده میشود، با هدف تقویت خواص مادهٔ زمینه در مواد مرکب پراکنده شده است. در برخی موارد جزء سومی هم به زمینه اضافه میشود که نقش چندانی در بهبود خواص ندارد و فقط برای افزایش حجم و کاهش هزینهٔ تولید نهایی به مواد افزوده شده است و به آن جزء پرکن<sup>6</sup> می گویند. هدف از افزودن اجزای دیگر به مادهٔ زمینه در مواد مرکب، تغییر یا بهبود خواص مادهٔ زمینه و بهدست آوردن مادهای ترکیبی با خواص دلخواه و بهبود یافته است.

سادهترین و قدیمی ترین مادهٔ مرکب ساخته شده به دست بشر کاه گل است. اگر از خاک معمولی گل درست کنیم و درنهایت، دیواری از آن بسازیم، دیوار به دست آمده استحکام و طول عمر مناسبی نخواهد داشت؛ ولی با افزودن مقدار کمی کاه به آن، استحکام و طول عمر دیوار بسیار افرایش خواهد یافت. نکتهٔ مهم این است که رشته های کاه درون کاه گل همچنان کاه هستند؛ یعنی هیچ تغییری در ماهیت آنها ایجاد نشده است. این ویژگی دربارهٔ خاک موجود در کاه گل هم صادق است و کلوخه های موجود در کاه گل هیچ تفاوتی با یک کلوخ عادی ندارند. با این حال، حضور این دو مادهٔ کاملاً متفاوت، در کنار هم موجب بهبود چشم گیر خواص موردنظر می شود (استحکام و ماند گاری بالا) و کاه گل را به پرکاربردترین مادهٔ ساختمانی در سال های دور تبدیل دور کرده است. این مثال ساده نشان دهندهٔ اهمیت مواد مرکب برای انسان است. امروزه، کاه گل جای خود را به بتن، که آن هم مادهای مرکب به شمار می رود، داده است.

- 1- Graphene
- 2- Nanocomposite material
- 3- Nanoporous material
- 4- Nanocrystalline material
- 5- Composite
- 6- Matrix
- 7- Reinforcement
- 8- Filler

اگر یکی از اجزای مادهٔ مرکب در ابعاد نانو باشد (انواع نانومواد صفربعدی، یکبعدی و دوبعدی)، مادهٔ مرکب حاصل را مادهٔ مرکب نانویی یا دراصطلاح، مادهٔ نانوترکیب مینامند. بهطورمعمول، در مواد نانوترکیب جزء تقویتکنندهای که به زمینه اضافه میشود مادهای نانوساختار است. بهبود خواص در مواد مرکب نانویی بسیار چشم گیرتر از مواد مرکب معمولی است و دلیل آن برهمکنش بسیار قوی انواع نانومواد استفاده شده بهعنوان تقویتکننده در تهیهٔ مواد نانوترکیب است.

**مواد نانومتخلخل:** مادهای که تخلخل<sup>۱</sup> آنها (نسبت حجم فضای خالی ماده به حجم ظاهری ماده) بین ۲۰٪ تا ۹۵٪ باشد، مادهٔ متخلخل<sup>۲</sup> نامیده میشود. مواد نانومتخلخل دارای حفرههایی در ابعاد نانو بوده (قطر کمتر از ۱۰۰ mm) بخش وسیعی از حجم آنها را فضای خالی تشکیل میدهد. وجود حفرههای بسیار ریز و مرتبط به هم سبب ایجاد سطح ویژهای (نسبت سطح به جرم) در مواد نانومتخلخل میشود. از مهمترین خواص مواد نانومتخلخل میتوان به سطح ویژهٔ بسیار بالا، نفوذپذیری یا تراوایی بالا و عایق بودن در برابر گرما و صوت اشاره کرد.

مواد نانومتخلخل براساس اندازهٔ حفرهها به سه گروه ریز حفره <sup>۲</sup> (دارای حفرههایی با قطر کمتر از mm ۲)، متوسط حفره<sup>۴</sup> (دارای حفرههایی با قطر ۵۰ m – ۲) و درشت حفره<sup>6</sup> (دارای حفرههایی با قطر بیشتر از ۵۰ m) تقسیم میشوند. مواد نانومتخلخل کاربردهای بسیاری دارند. این نانومواد در انواع فیلتر و غشا، تصفیهٔ آب، عایق صوتی و حرارتی، کاتالیست و پایهٔ کاتالیست<sup>\*\*</sup>، ذخیرهسازی هیدروژن و حامل دارو استفاده میشوند. انواع آیروژلها<sup>۴</sup>، زئولیتها<sup>۷</sup> و اکسید آلومینیوم آندایزشده (AAB)<sup>۸</sup> از شناختهشدهترین مواد نانومتخلخل به شمار میروند.



**نانومواد ریزدانه:** همهٔ مواد از اتم یا یون تشکیل شدهاند. اگر این اجزای سازنده با نظم و الگوی مشخص کنار یکدیگر قرار گرفته باشند (نظم دوربرد و تکرارشونده)، ماده نظم بلوری خواهد داشت؛ در غیر اینصورت ماده بی شکل خواهد بود. در شرایط واقعی، این نظم ساختاری در مواد بلورین سرتاسری نیست و کل ماده را در بر نمی گیرد بلکه ماده از ذرات کوچکتری که هر کدام این نظم بلوری را دارند، تشکیل شده است؛ برای مثال یک شاخه نبات را در نظر بگیرید

- 1- Porosity
- 2- Porous
- 3- Microporous
- 4- Mesoporous
- 5- Macroporous
- 6- Aerogel
- 7- Zeolite
- 8- Anodized aluminum oxide

٣٣

(شکل ۲۵–آ)، این قطعهٔ نبات از تعداد زیادی دانههای<sup>۱</sup> بلورین متصل به هم تشکیل شده است. نوع نظم ساختاری (شبکهٔ بلور) در همهٔ این دانهها یکسان است و تفاوت فقط در جهت گیری این دانههای بلوری کوچک نسبت به هم است. محل اتصال این دانهها، که مرزدانه<sup>۲</sup> نامیده می شوند، ساختار بلوری ندارد و محل گذار جهت نظم بلوری از دانهای به دانه دیگر است (شکر ۲۵–آ)، این دانهها، که مرزدانه<sup>۲</sup> نامیده می شوند، ساختار بلوری ندارد و محل گذار جهت نظم بلوری از دانهای به دانه محل اتصال این دانهها، که مرزدانه<sup>۲</sup> نامیده می شوند، ساختار بلوری ندارد و محل گذار جهت نظم بلوری از دانهای به دانه دیگر است (شکل ۲۵–ب). چنین ساختاری را که از اتصال تعداد زیادی دانهٔ بلورین شکل گرفته است، مادهٔ چندبلوری<sup>۲</sup> می امند. همچنین، ممکن است که یک جسم فقط از یک بلور تشکیل شده و هیچ دانهای نداشته باشد؛ چنین موادی را مواد تک بلور<sup>۴</sup> می نامند. دانه باشد؛ دانه بندی فقط در مواد حجیم دیده نمی شود بلکه در نانومواد هم وجود دارد؛ برای مثال نانوذرات مواد تک بلور<sup>۴</sup> می نامند. دانه بندی فقط در مواد حجیم دیده نمی شود بلکه در نانومواد هم وجود دارد؛ برای مثال نانوذرات



بسیاری از موادی که در اطراف ما وجود دارند چندبلوری هستند؛ مانند انواع فلزات. شکل ۲۶ تصویری میکروسکوپی از دانههای یک قطعه تیتانیوم را نشان میدهد. در این تصویر، مرزدانهها بهخوبی قابلمشاهدهاند. اتمهای موجود در مرز

> یک دانه به هیچکدام از دانهها تعلق ندارند. مرزدانهها نوعی نقص بلوری به شمار میآیند که تأثیر زیادی روی خواص فیزیکی مواد چندبلوری میگذارند.

> سومین گروه اصلی نانومواد حجیم، مواد نانوبلورین یا نانومواد ریزدانهاند. ابعاد دانههای این مواد در محدودهٔ نانومتری است. اگر ابعاد دانهها در مواد چندبلوری کمتر از ماه ۱۰۰ باشد، به آنها مواد نانوبلورین گفته میشود. ریزدانهشدن مواد چندبلوری موجب بهبود چشم گیر برخی از خواص مکانیکی آنها، ازجمله استحکامشان میشود؛ ازاینرو، امروزه به مواد نانوبلورین توجه میشود.



1- Grain

- 2- Grain boundary
- 3- Polycrystalline
- 4- Single crystal



🏾 مقدمه:

آنچه مواد مختلف را از هم متمایز می سازد و کاربردهای خاصی برایشان ایجاد می کند خواص آنهاست؛ برای مثال چیزی که باعث می شود در تهیهٔ بیشتر سیمهای الکتریکی از فلز مس استفاده کنیم، خاصیت رسانایی الکتریکی مناسب آن است و آنچه موجب می شود فولاد را در ساخت بدنه خودروها به کار ببریم، خواص مکانیکی مناسب و استحکام آن است. به همین ترتیب، استفاده از این دو فلز به جای هم، هر چند امکان پذیر است، اما سبب کیفیت پایین محصول نهایی و ناکارآمدی آن می شود. بنابراین، لازم است که خواص مواد اطرافمان را بشناسیم تا بتوانیم برای کاربردشان تصمیم بگیریم.

خواص مواد به دو گروه اصلی تقسیم میشوند؛ خواص فیزیکی، مانند رسانایی الکتریکی و حرارتی، رنگ، چگالی، ظرفیت گرمایی و خواص شیمیایی، مانند واکنش پذیری، سمی بودن، احتراق پذیری و خاصیت اسیدی یا بازی. بر اساس دستهبندی دیگر، خواص به دو گروه مقداری و شدتی تقسیم میشوند. خواص مقداری، همان طور که از نامش پیداست، به مقدار مادهٔ موردنظر بستگی دارد؛ مانند جرم و حجم. این خواص در مطالعهٔ مواد اهمیت چندانی ندارند؛ در مقابل، خواص شدتی مستقل از مقدار ماده است و برای هر مقدار ماده مشخص و یکسان است. چگالی، رنگ، رسانایی الکتریکی و حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه از جمله خواص شدتی مواد به شمار می روند. برای مثال، در هر جای کرهٔ زمین که باشیم، در دمای صفر درجه سانتی گراد و فشار یک اتمسفر، چگالی آب با هر حجم دلخواهی برابر <sup>3-</sup> عواهد بود.

# 🗞 خواص جدید در ابعاد نانو

مدتها دانشمندان بر این باور بودند که خواص شدتی مواد همواره ثابت و مستقل از مقدار ماده است؛ اما مشاهدات اخیر از خواص مواد در ابعاد نانو (کمتر از ۱۰۰ nm) حاکی از آن است که در دنیای نانو اینگونه نیست. محققان با بررسی انواع ذرات نانومتری طلا در شکلهای هندسی مختلف دریافتهاند که این ذرات زرد رنگ نیستند؛ برای مثال ذرات ۲۰ نانومتری طلا قرمز، ذرات ۴۰ نانومتری طلا ارغوانی و ذرات ۶۰ نانومتری طلا بنفش دیده می شوند (شکل۱). نکتهٔ جالبتر این است که رنگ نانوذرات طلا علاوه بر اندازه، به شکل هندسی آنها هم بستگی دارد؛ برای مثال، نانوذرات ۵۰ mm ۵۰ نانومتری طلا با دو هندسهٔ کروی و هرمی شکل، رنگ متفاوتی با یکدیگر دارند.



شکل ۱: تغییر رنگ نانوذرات طلای معلق در آب با تغییر اندازهٔ آنها [۱۱]

همانطور که در شکل ۱ مشهود است، خواص نوری طلا در ابعاد نانومتری با خاصیت فیزیکی این ماده در ابعاد تودهای کاملاً متفاوت است. علاوه بر این، خواص شیمیایی آن هم در ابعاد نانو تغییر می کند. در ابعاد تودهای، طلا عنصری بسیار پایدار است و واکنش پذیری شیمیایی بسیار کمی دارد اما در ابعاد کمتر از ۵ نانومتر، ذرات طلا بهقدری فعال می شوند که می توان از آنها به عنوان کاتالیست در واکنش های شیمیایی استفاده کرد.


سکل ۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از یک نانوذرهٔ طلا بر روی سطح تیتانیوم دیاکسید [۱۲]

شکل ۲ تصویری از یک نانوذرهٔ طلای تثبیتشده بر روی سطح تیتانیوم دیاکسید (TiO<sub>2</sub>) را نشان میدهد. از این نانوسامانه بهعنوان کاتالیست استفاده می شود. این امر حکایت از آن دارد که خواص شیمیایی ذرات در ابعاد نانو، نسبت به حالت تودهای، تغییرات چشم گیری پیدا می کند. بنابر مطالب بیان شده، می توان نتیجه گرفت که مفهوم خواص شدتی و عدم وابستگی این خواص به مقدار ماده، فقط در ابعادی بزرگتر از ابعاد میکرومتر صادق است؛ این در حالی است که خواص مواد در ابعاد نانو به اندازه (و درنتیجه مقدار ماده) و شكل و هندسهٔ مواد وابسته است.

اکنون این سؤال پیش میآید که چه پدیدهای خواص ماده را این چنین تغییر میدهد؟ چه چیزی سبب میشود که مثلاً طلا، که بهعنوان فلزی بیاثر در واکنشهای شیمیایی شناخته میشود، بهقدری فعال گردد که بهعنوان کاتالیستی فعال مورداستفاده قرار گیرد؟ یا چه عاملی سبب میشود که نانوذرات همجنس و هماندازه با شکل هندسی متفاوت، رنگ متفاوتی از خود نشان دهند؟

# 🚸 🛚 ساختار الکترونیکی مواد

تمام اتمها از هسته و الکترون تشکیل شدهاند. هسته در مرکز اتم قرار دارد و الکترونها به دور آن میچرخند. چیدمان الکترونها در اطراف هسته براساس انرژی آنهاست؛ بهاینترتیب که الکترونهایی که انرژی جنبشی کمتری دارند در ترازهای نزدیکتر به هسته و الکترونهایی که انرژی جنبشی بیشتری دارند در ترازهای دورتر از هسته قرار میگیرند. نوع آرایش الکترونها در اطراف یک اتم، بهویژه الکترونهای بیرونی اتم که میتوانند در حین واکنشهای شیمیایی مبادله شوند، تعیینکنندهٔ بسیاری از خواص یک اتم، بهخصوص خواص شیمیایی آن است. لازم به ذکر است که این نوع ساختار ساده فقط به ترازهای انرژی ساختارهایی مربوط است که از تکاتمها تشکیل شدهاند و هیچ اتم دیگری در نزدیکی آنها وجود ندارد و درنتیجه، ابرهای الکترونی آنها تحتتاثیر اتمهای دیگر قرار نمیگیرد.

سؤالی که اکنون پیش می آید این است که اگر بخواهیم شرایط واقعی از تک اتمها را بررسی کنیم، ساختار الکترونیکی مواد چگونه خواهد بود؟ در شرایط واقعی ساختار الکترونیکی مواد، در مقایسه با ساختارهای تک اتمی، بسیار پیچیده تر است؛ بهویژه در مواد جامد که در آنها اتمها در فاصلهٔ بسیار اندکی به هم قرار دارند. شکل ۳ در طرحی ساده نشان می دهد که در دنیای واقعی و در شرایطی که اتمهای ماده بسیار به هم نزدیک هستند، مانند حالت جامد، ابرهای الکترونی اتمها مستقل از یکدیگر نبوده و هم پوشانی قابل توجهی باهم دارند. این ساختارها در شرایطی که میان اتمها پیوندی برقرار باشد، بسیار پیچیده تر می شوند.



در مواد جامد، فاصلهٔ اتمها بسیار کم است؛ به گونه ای ابرهای الکترونی آنها با یکدیگر هم پوشانی دارند. این امر موجب می شود نتوانیم بخش قابل توجهی از الکترون های مادهٔ جامد را منحصر به اتمی خاص بدانیم. ازاین رو، استفاده از مدل هایی مانند آنچه برای تک اتمها به کار بردیم، برای مواد جامد با تعداد اتم زیاد صحیح نیست. تک اتمی از یک مادهٔ جامد در نظر بگیرید که سایر اتمهای هم نوعش به تدریج، به آن افزوده می شوند تا توده ای جامد را شکل دهند (شکل ۳). برای مطالعهٔ رفتار الکترونیکی چنین مجموعهٔ متراکمی، باید رفتار جمعی الکترون های موجود در ساختار را بررسی کنیم. در چنین شرایطی، به جای تک الکترونی که انرژی و مشخصات کوانتومی ویژهٔ خود را دارد (حالت تک می شود. با کنار هم قرار گرفتن تعداد زیادی تراز انرژی، ناحیه ای ایجاد می شود که توانایی پذیرش این تعداد الکترون را دارد. محل قرار گرفتن تعداد زیادی تراز انرژی، ناحیه ای ایجاد می شود که توانایی پذیرش این تعداد الکترون دارای دو اوربیتال نوع s و p است، به صورت طرحی ساده در شکل ۴ به تصویر کشیده شده است. لازم به ذکر است که دارای دو اوربیتال نوع s و p است، به مورت طرحی ساده در شکل ۴ به تصویر کشیده شده است. لازم به ذکر است که دارای دو اوربیتال نوع s و p است، به مورت طرحی ساده در شاد مکر ۴ به تصویر کشیده شده است. در مان در دالت که



همان طور که مشاهده می کنید، حالتهای انرژی مجاز در اجسام جامد برای الکترونها به شکل نوارهای انرژی مشخص می شوند. همان گونه که خواص شیمیایی تک اتمها بر اساس تعداد الکترونها و جای گیری آنها در ترازهای انرژی قابل پیش بینی است، بسیاری از خواص مواد جامد هم بر اساس ساختار نواری آنها بیان می شود. مهم ترین خاصیت مواد جامد، که با استفاده از ساختار نواری قابل توجیه است، رسانایی الکتریکی است. بر اساس نظریهٔ نواری، الکترونهای مادهٔ جامد می توانند در نوارهای انرژی حضور داشته باشند. بین نوارها، ناحیهٔ ممنوعهای وجود دارد که الکترونها مجاز به حضور در آنجا نیستند (مشابه آنچه در فاصلهٔ میان دو تراز انرژی در تک اتمها وجود دارد). این ناحیهٔ ممنوعه شکاف نواری<sup>7</sup> نام دارد. حضور الکترون در نوارها به معنای آن است که انرژی الکترونها معادل انرژی یکی از ترازهای موجود در این نوارهاست. فاصلهٔ میان دو نوار انرژی بیرونی و وضعیت پر، خالی یا نیمه پربودن آنها تعیین کنندهٔ خواص رسانایی مادهٔ جامد است. بیرونی تروار انرژی را نوار رسانش<sup>۳</sup> و نوار پیش از آن را نوار ظرفیت<sup>۳</sup> می نامند.

- 3- Conduction band
- 4- Valence band

ثحمال لاوم واص مواا

<sup>1-</sup> Energy band

<sup>2-</sup> Band gap

### 💿 مواد رسانا، نیمهرسانا و نارسانا

دستهبندی کلی مواد جامد براساس رسانش جریات الکتریکی است و آنها را به سه دستهٔ رسانا، نیمهرسانا <sup>۱</sup> و یا نارسانا تقسیم میکند. از میان نظریههای متنوعی که میکوشند خاصیت الکترونیکی مواد جامد را توضیح دهند، نظریهٔ نواری بهخوبی این کار را انجام میدهد؛ در واقع رسانایی یک مادهٔ جامد به وضعیت نوار رسانش آن ماده بستگی دارد.

### 🔶 مواد رسانا و نارسانا

نیمه پر بودن نوار رسانش یا هم پوشانی نوار رسانش خالی با نوار ظرفیت این امکان را فراهم می کند که الکترونهای موجود در ترازهای داخلی نوار رسانش، بتوانند تحت تأثیر میدان الکتریکی خارجی گذارهای بین ترازی داشته باشند. گذارهای بین ترازی در نوار رسانش موجب می گردد که جسم رسانای الکتریسیته شود؛ درحالی که اگر نوار ظرفیت به طور کامل پر از الکترون و نوار رسانش خالی از الکترون و شکاف انرژی میان این دو بزرگ باشد، گذارهای بین ترازی ناممکن خواهند بود. حاصل این امر نارسانایی ماده است. بزرگی شکاف انرژی میان این دو نوار در مواد نارسانا بیش از ۵ الکترون ولت (eV) است<sup>۲</sup> که امکان گذارهای بین نواری را در شرایط عادی غیرممکن می سازد (شکل ۵).

#### 🛧 مواد نيمهرسانا

علاوه بر دو گروه اصلی رسانا و نارسانا، در قرن نوزدهم، گروه سومی از مواد با خواص الکتریکی متفاوت مشاهده شدند. این گروه خواص الکتریکی متفاوتی با هر دو گروه نخست داشتند؛ برای مثال مقاومت الکتریکی آنها با افزایش دما کاهش مییافت؛ درحالیکه در مواد رسانای معمولی افزایش دما موجب افزایش مقاومت الکتریکی میشد. امروزه، این مواد با نام نیمهرسانا شناخته میشوند.

همان طور که بیان شد، در مواد جامد نارسانا، نوار ظرفیت کاملاً پر است. ناممکن بودن گذارهای بین ترازی در این نوار موجب می گردد که رسانش جریان الکتریکی از طریق این ماده امکانپذیر نباشد. ساختار نواری نیمهرساناها در ظاهر مشابه مواد نارسانا است؛ با این تفاوت که بزرگی شکاف انرژی میان نوار ظرفیت و نوار رسانش مواد نیمهرسانا حدود V ۲ ۷۲ است. وجود چنین شکاف انرژی کوچکی سبب می گردد تا انرژی موردنیاز برای گذارهای بین نواری بهراحتی، از طریق اعمال میدان الکتریکی یا افزایش دما تأمین شود. با تأمین انرژی لازم، الکترونها بهراحتی می توانند به ترازهای موجود در نوار رسانش منتقل شوند و در رسانایی شرکت کنند. همچنین، با انتقال الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش، جایی خالی در این نوار ایجاد می شود که می تواند در فرایند رسانش الکتریکی شرکت کند؛ این جای خالی حفره تامیده می شود. کوچکی شکاف انرژی میان نوارهای رسانش و ظرفیت این امکان را فراهم می آورد که بتوان رسانای نامیده می شود. کوچکی شکاف انرژی میان نوارهای رسانش و ظرفیت این امکان را فراهم می آورد که بتوان رسانای مواد نیمهرسانا را با تحریک نوری و حرارتی افزایش داد. به همین دلیل است که مقاومت الکتریکی مواد نیمهرسانا با افزایش دما کاهش می یابد. در میان عناصر مختلف، سه عنصر سیلیکون (iS)، ژرمانیوم (GP)، و تربیم (dT) عناصری اند حفرهها برابر است. افزایش تعداد الکترونها یا حفرهها در یک نیمهرسانای ذاتی<sup>1</sup> می نامند. در این مواد تیمان می کان وجود دارد که با اضافه کردن کمی ناخالصی به ساختار بلوری یک نیمهرسانای ذاتی، به تعداد الکترونها یا حفرههای آن افزود. فرایند افزایش ناخالصی را آلایش<sup>6</sup> می نامند.

3- Hole

- 4- Intrinsic semiconductor
- 5- Doping

<sup>1-</sup> Semiconductor

۲- الکترونولت (electron volt – eV) یکای اندازه گیری انرژی در فیزیک است و برابر انرژی یک الکترون در میدان الکتریکی به بزرگی ۷ ۱ است.

اگر در اثر آلایش یک نیمهرسانا تعداد حاملهای بار منفی (الکترونها) در ساختار آن بهطور غیرطبیعی افزایش یابد، این نوع نیمهرسانا را نیمهرسانای نوع منفی (n) <sup>(</sup> مینامند؛ به همین ترتیب، اگر تعداد حاملهای بار مثبت (حفرهها) آن بهطور غیرطبیعی افزایش یابد، به این نیمهرسانا نوع مثبت (q)<sup>۲</sup> می گویند. چنین نیمهرساناهایی را نیمهرساناهای غیرذاتی<sup>۲</sup> مینامند.



# 📀 🛛 ساختار الکترونیکی نانومواد

شکل ۴ نشاندهندهٔ نحوهٔ تبدیل ترازهای انرژی گسستهٔ موجود در یک تکاتم به نوارهای انرژی پیوسته در یک مادهٔ تودهای است که از به هم پیوستن تعداد زیادی اتم ایجاد شده است. در نانومواد، کاهش اندازه و ابعاد ماده سبب کاهش تعداد اتمهای سازندهٔ ماده میشود؛ درنتیجه میزان تجمع اتمها کاهش پیدا مییابد. در چنین شرایطی فرایند شکلگیری نوارهای انرژی برعکس میشود و این نوارها بهتدریج و با کاهش ابعاد ماده شکافته و به ترازهای گسسته تبدیل میشوند (شکل ۶). روند گسستگی نوارهای انرژی را کوانتیزه<sup>1</sup> شدن مینامند. براین اساس، میتوان گفت که ساختار الکترونیکی نانومواد جامد حد واسطی از حالت اتمی و تودهای آنهاست. چنین ساختار الکترونیکی موجب میشود که خواص نانومواد هم حد واسطی از خواص مادهٔ تودهای و تکاتمها یا تکمولکولهای سازنده شان باشد.

گسسته شدن نوارهای انرژی مواد جامد مهم ترین عاملی است که موجب می شود خواص مواد در ابعاد نانو تغییر کند. به راحتی می توان تصور کرد که مقدار و نوع گسسته شدن نوارهای انرژی ارتباط مستقیمی با تعداد اتم های تشکیل دهنده دارد؛ درنتیجه، اندازهٔ بُعد مشخصه<sup>6</sup> نانومواد دارد. بنابراین، به راحتی می توان با تغییر اندازهٔ بُعد مشخصهٔ نانومواد، خواص آنها را هم تغییر داد. این امر موجب می گردد که خواص نانومواد دراصطلاح، وابسته به اندازه<sup>6</sup> باشد. این ویژگی منحصر به فرد دانشمندان و پژوه شگران را قادر می سازد تا خواص متفاوتی از یک نوع مادهٔ مشخص به دست آورند و در زمینه های مختلف از آن به ره ببرند.

4- Quantized

<sup>1-</sup> N-type

<sup>2-</sup> P-type

<sup>3-</sup> Extrinsic

۵- منظور از اندازه بُعد مشخصه، اندازه بُعدی است که در مقیاس نانو قرار داد؛ برای مثال بُعد مشخصه برای یک نانوسیم، قطر مقطع آن، برای یک لایدنازک ضخامت و برای یک نانوذره قطر آن است.



# 🔅 فیزیک حاکم بر ابعاد نانو

اندازهٔ نانومواد بیشتر به اتمها و مولکولهای منفرد نزدیک است تا مواد تودهای؛ بهنحویکه نیروهایی مانند گرانش، که بر اجسام تودهای تأثیرگذار است، اثر چندانی بر نانومواد ندارد. ازاینرو، برای توضیح رفتار آنها ناگزیریم از قوانین فیزیک، که بر چنین ابعاد کوچکی حکمفرماست، استفاده کنیم. مکانیک کوانتوم دربردارندهٔ قوانین و نظریههایی است که رفتار مواد در ابعاد کوچک (در حد اتمها و مولکولها) را بهخوبی توجیه میکند؛ لذا برای مطالعه و بررسی پدیدهها در ابعاد نانو باید از مکانیک کوانتوم استفاده کنیم.

با کاهش ابعاد ماده و گذر از اندازهٔ بحرانی، بهتدریج قوانین مکانیک کلاسیک کم اثر میشود و قابلیت پیش بینی و توجیه رفتار ماده را ندارد. با گذر از این مقدار بحرانی، وارد محدودهای میشود که آن را ابعاد نانو مینامیم. با ورود به ابعاد نانو، قلمرو حکمفرمایی مکانیک کوانتوم آغاز میشود. با ورود به این ابعاد (که بهصورت کلی کمتر از nn ۱۰۰ فرض شده است) رفتار مواد، در مقایسه حالت تودهای، دگرگون میشود. در این محدوده، رفتار مواد با تغییر اندازه تغییر می کند و پدیدهها وابسته به اندازه میشوند. آنچه در این ابعاد کوچک نمایان میشود، تفاوتهای ناشی از رفتار دوگانهٔ موجی – ذرهای<sup>۲</sup> الکترونهای ماده است. نخستینبار ماکس پلانک<sup>۲</sup>، فیزیکدان آلمانی، موضوع دوگانگی موج و ذره را مطرح کرد. پیش تر از پلانک، جامعهٔ فیزیکدانان بر این باور بودند که امواج الکترومغناطیسی ماهیتی پیوسته دارند. پلانک با ارائهٔ یک مدل جدید، پرده از ماهیت واقعی امواج الکترومغناطیسی برداشت. براساس مدل پلانک، نور و همهٔ امواج الکترومغناطیسی ماهیتی گسسته دارند. براین اساس، امواج الکترومغناطیسی از فوتونهای انرژی، که فوتون<sup>۴</sup> نامیده میشوند، تشکیل شدهاند. ازاینرو، هر کدام از طیفهای پر تو الکترومغناطیسی از فوتونهای انرژی، که فوتون<sup>۴</sup> نامیده میشوند، تشکیل شده اند. ازاینرو، هر کدام از طیفهای پر تو الکترومغناطیسی از فوتونهای با انرژی مشخص تشکیل شده است. انرژی فوتونها به طولموج<sup>۵</sup> و به تبع آن، به بسامد<sup>۶</sup> آن نور بستگی دارد.

- 1- Quantum mechanics
- 2- Wave-corpuscle duality
- 3- Max Planck
- 4- Photon

۵- فاصلهٔ دو قلهٔ پشت سرهم و یا فاصلهٔ دو قعر پشت سر هم در یک موج را طول موج مینامند.
۹- بسامد (frequency) معیار اندازه گیری تعداد تکرار یک رخداد در یک یکای زمانی معین است.

پلانک ارتباط میان بسامد و انرژی فوتون را بهصورت رابطهٔ ریاضی بیان کرد که بر اساس آن، انرژی یک فوتون نسبت مستقیمی با بسامد آن دارد:

- E = hv
- $v = c/\lambda$
- $E = hc/\lambda$

در رابطههای فوق، E انرژی تک فوتون، h ثابت پلانک که برابر J.s <sup>۳۳۰</sup> ۱۰× ۶/۶۲ v بسامد، c سرعت نور در خلاء و λ طولموج است.

پس از ارائهٔ این مدل توسط پلانک، که دلالت بر ماهیت موجی ذرهای نور داشت، لویی دوبروی ٔ این سؤال را مطرح کرد که آیا امکان دارد ذراتی که با سرعت مشخص در حال حرکتاند، رفتار موجی و طولموج مشخصی داشته باشند؟ مطالعات دوبروی درنهایت به تعریف طولموجی برای ذرات در حال حرکت منجر شد که امروزه، با عنوان طولموج دوبروی شناخته می شود:

 $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \tag{(f)}$ 

در رابطههای فوق  $\lambda$  طول موج ذره، h ثابت پلانک، m جرم ذره و v سرعت حرکت ذره است.

نتایج کارهای دوبروی نشان داد که موج و ماده ماهیتی جداییناپذیر از یکدیگر دارند و یک پدیدهٔ فیزیکی، بسته به شرایط، میتواند موج یا ذره باشد؛ برای مثال امروز میدانیم الکترونها، که بهعنوان ذره موردپذیرش همگاناند، ماهیت موجی ذرهای دارند و مطالعهٔ حرکت آن در اطراف اتم با تکیه بر خواص موجی آن امکانپذیر است.

مهمترین عاملی که همواره تعیین کنندهٔ خواص ماده است، وضعیت الکترونها و ساختار انرژی آنهاست؛ بررسی الکترونهای ماده با این دیدگاه قدیمی که الکترونها را ذره فرض می کند، ممکن نیست و باید آنها را با دید جدیدی بررسی کرد. براین اساس، در مواد تودهای، الکترونها به صورت امواجی پیوسته در هر سه راستای اصلی (x، y، z) در تودهٔ ماده حضور دارند و آزادانه حرکت می کنند. با این دیدگاه می توان برای الکترونهای یک مادهٔ جامد تودهای، موجی الکترونی متشکل از سه مؤلفه در راستای محورهای اصلی تعریف کرد. با کاهش ابعاد ماده در هر یک از این راستاها و در نهایت با گذر از اندازهٔ بحرانی، ابعاد ماده به قدری کوچک می شود که می توان آن را با طول موج دوبروی الکترونهای ماده مقایسه کرد. در چنین شرایطی، الکترونهای ماده دیگر آزادی عمل پیشین را ندارند و در فضای محدود ایجادشده در اثر کاهش ابعاد ماده، فقط موجهای خاصی می توانند نوسان کنند. انرژی الکترون در حال حرکت ارتباط معکوسی با طول موج الکترون دارد (رابطهٔ ۳) در چنین شرایطی انرژی ای که الکترونها می توانند داشته باشند گسسته شده و در می الکترونها محدود می شوند. پدیدهٔ محدودشدن الکترونهای ماده در اثر کاهش ابعاد را محدودیت کوانتومی می اماده الکترون ها محدود می شوند. پدیدهٔ محدودشدن الکترونهای ماده در اثر کاهش ابعاد را محدودیت کوانتومی می اماند. تحت تأثیر محدودیت کوانتومی نانومواد، خواص مواد نانویی گسسته (کوانتیزه) می شود؛ به این تر تی به با تغییر اندازه، خواص نانوماده هم تغییر می کند.

اندازهای که با گذر از آن محدودیت کوانتومی برای مواد مختلف آغاز میشود، در کنار عوامل مختلف، به نوع ماده و دمای آن هم بستگی دارد و این پدیده معمولاً در دمای محیط و در ابعادی کمتر از ۱۰ مارخ میدهد. کاهش دما موجب افزایش این اندازه میشود و در دماهای بسیار پایین تا ۱۰۰ افزایش مییابد. محدودهای که خواص مواد دگرگون میشود و در حیطهٔ کاری فناوری نانو قرار میگیرد بهطورعمومی، ۱۰۰ ستریف شده است. با کاهش ابعاد ماده تا اندازهٔ میکرومتری، کاهش ابعاد بهقدری نیست که سبب محدودشدن الکترونهای ماده شود؛ ازاینرو، با کاهش

- 1- Louis de Broglie
- 2- Quantum confinement

ثتيال لازم نواص مواد

(1)

(٢)

(٣)

ابعاد تا اندازههای میکرومتری، حتی μm ۵/۰، تغییر خواص چندانی دیده نمی شود. این تغییرات با ورود اندازهٔ ذرات به کمتر از ۱۰۰ بسیار زیاد است و موجب می شود به حد بالای نانوفناوری بر سیم. همچنین، کاهش اندازه به کمتر از ۱۳۸ /۰ سبب ورود به ابعاد زیراتمی می شود؛ در حالی که هدف فناوری نانو دست کاری مواد در ابعاد اتمی یا مولکولی است نه زیراتمی. علاوه بر این، معمولاً در محدودهٔ ابعادی mn ۱ – ۱۰ امکان کنترل صحیح و کامل ساختار و چیدمانی اتمی مواد وجود ندارد. این امر در کنار بسیاری از محدودیتهای فنی، از ناممکن بودن تعیین انرژی و مکان ذرات کوانتومی (اصل عدمقطعیت هایز نبرگ<sup>1</sup>)، ناشی می شود؛ لذا امکان دست کاری ذرات در این ابعاد وجود ندارد و ابعاد کمتر از mn ۱ در حیطهٔ کاری نانوفناوری قرار نمی گیرد. بنابراین، ۱۰m ۲ به عنوان حد پایین فناوری نانو معرفی شده است.

## 🚸 دستهبندی نانومواد براساس ابعاد محدودیت کوانتومی

پیش از این، در بخش تقسیم بندی نانومواد بر اساس ابعاد، مبنای دسته بندی ابعادی نانومواد بیان شد. معیار دیگری هم برای دسته بندی نانومواد وجود دارد که بر محدودیت کوانتومی ایجاد شده برای الکترونهای ماده در اثر کاهش ابعاد آن مبتنی است؛ برای مثال، نانوساختارهایی مانند نانوذرات و نقاط کوانتومی در هر سه بعد خود اندازهٔ کوچک تر از ۱۰۰ nm دارند و ازاین رو، صفر بعدی نامیده می شوند. حال اگر محدودیت کوانتومی ایجاد شده برای موج الکترون موادی که در هر سه بعد کوچک تر از ۱۰۰ nm هستند را مدنظر قرار دهید، خواهید دید که این موج در هر سه بعد محدود شده است؛ پس می توان موج الکترون چنین موادی را صفر بعدی فرض کرد و نتیجه گرفت که ابعاد موج الکترون یک نانوماده برابر با ابعاد هندسی آن است.

بههمین ترتیب، بررسی نانوساختارهای یک بعدی نشان میدهد که الکترونهای این ساختارها در دو راستا محدود شدهاند و در یک راستا (راستای طولی) آزادند؛ بنابراین، موج الکترون آنها یک بعدی خواهد بود. جدول ۱ دو دسته بندی موجود برای مواد نانوساختار را به طور خلاصه ارائه می کند.

جدول ۱: دستهبندی مواد نانوساختار بر اساس ابعاد هندسی و محدودیت کوانتومی			
ابعاد موج الكترون	ابعاد محدود شده	ابعاد هندسی	دستەبندى
٣	•	٣	سەبعدى
٢	١	٢	دوبعدى
١	٢	١	يکبعدی

# 🔶 اثر افزایش سطح بر رفتار مواد

صرفنظر از اینکه یک ماده تودهای یا یک نانوماده را در نظر بگیریم، برخی از خواص فیزیکی و شیمیایی آن ماده به خواص سطحی آن وابسته است. سطح ماده عملکردهای مختلفی دارد؛ برای مثال در نقش رابط جریان عبوری ماده یا انرژی را کنترل می کند؛ واکنش شیمیایی بر روی سطح مواد جامد رخ می دهند و هر نوع برهم کنش با محیط پیرامون و جذب اتمها یا مولکول ها بر روی سطح انجام می شود. به شاخهای از علم که با خواص شیمیایی، فیزیکی و زیستی سطح سروکار دارد، علم سطح<sup>۲</sup> می گویند. حال اگر مادهٔ تودهای را به تعدادی نانوذره تبدیل کنیم، در شرایطی که مقدار کلی ماده ثابت بماند، سطح کلی حاصل بسیار افزایش می یابد؛ در این حالت، نسبت اتمهای سطحی به کل اتمهای سازنده آن هم افزایش قابل توجهی می یابد. این پدیده به صورت نمادین، در شکل ۷ نشان داده شده است.

2- Surface science

گت\_ل لروم خواص مواد

مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك

<sup>1-</sup> Heisenberg's uncertainty principle

افزایش نسبت سطح به حجم ماده موجب می گردد تا خواص سطحی ماده به خواص تودهٔ آن غالب شود. ازاینرو، پدیدههایی که به سطح بیشتری نیاز دارند راحت تر در این شرایط رخ می دهند؛ \* در مثالی ساده، می توان قابلیت انحلال پذیری قند و پودر قند در آب را درنظر گرفت؛ با وجود اینکه حل شدن قند در آب زمان و انرژی زیادی صرف می کند، پودر قند به سرعت و به راحتی در آب حل می شود.

بر اساس آنچه علم سطح بیان میکند، گروههای شیمیایی حاضر در سطح ماده خواص شیمیایی سطح مواد را تعیین میکنند؛ برای مثال، اگر سطح ماده از مولکولهای آبگریز پوشیده باشد، این سطح آبگریز خواهد بود. همچنین، اگر سطح یک فلز (مانند آلومینیوم) پوشیده از مولکولهایی باشد که با اکسیژن موجود در محیط واکنش نشان ندهند، این ماده در برابر پوسیدگی حاصل از اکسیدشدن مقاوم خواهد بود. حال اگر پوشش سطحی مادهای از اتمها و مولکولهایی باشد که تمایل فراوانی به واکنش دارند، این ماده بسیار واکنش پذیر خواهد بود. این اتفاقی است که برای انواع نانوذرات، بهویژه نانوذرات فلزی، هم رخ میدهد.



بخش قابل توجهی از اتمهای تشکیل دهندهٔ نانومواد، بهویژه نانوذرات، اتمهای سطحی هستند. این امر موجب می گردد که خواص و رفتار کلی ماده برآیندی از رفتار اتمهای سطحی باشد با کاهش اندازهٔ ذرات، این اثر نمود بیشتری می ابد. از این رو، خواص سطحی در نانومواد برجسته تر از سایر خواص است. چنین پدیده ای در فرایندها و واکنش های سطحی بسیار تعیین کننده است و موجب تسهیل آنها می شود؛ به نحوی که در عمل، نانوذرات از نظر شیمیایی بسیار فعال بوده و به سرعت، با محیط پیرامون خود وارد واکنش می شوند.



کلاوه بر افزایش فعالیت شیمیایی سطح، مقدار زیادی از اتمهای نانومواد در سطح آنها قرار دارند (شکل ۸) این امر سبب میشود که برخی از ویژگیهای فیزیکی نانومواد، نظیر نقطهٔ ذوب، نسبت به حالت تودهای آنها تغییر کند. بهبیاندیگر، با کاهش ابعاد مواد و نانومقیاسشدن آنها، نقطهٔ ذوبشان هم کاهش مییابد؛ زیرا انرژی لازم برای جداکردن اتمهای سطحی کمتر از اتمهای درون ماده است. در نانومواد نسبت قابل توجهی از اتمها در سطح ماده حضور دارند؛ بنابراین انرژی لازم برای

غلبه بر نیروی چسبندگی بینمولکولی (یا بیناتمی)، که سبب میشود مولکولها (یا اتمها) ثابت بماند و ماده حالت جامد داشته باشد، کمتر میشود و درنتیجه، دمای ذوب ماده کاهش مییابد. ثتنال لاوم نواص مواا

# 🚸 \_تغییر خواص در ابعاد نانو

خواص مواد مختلف با کاهش اندازه و ورود به ابعاد نانو دچار تغییرات مختلفی می شود. در ادامه، چند مورد از این تغییر خواص بهطور خلاصه و ساده بررسی می گردد.

## 回 تغییر رنگ نانوذرات

نانوذرات، در مقایسه با مواد تودهای، خواص نوری متفاوتی از خود نشان میدهند. این خواص نوری ویژه ناشی از چند برهمکنش متفاوت بین نور و نانوذرات است و درنهایت، منجر میگردد که نانوذرات را با رنگهای متفاوتی از رنگ تودهای آنها مشاهده کنیم. نکتهٔ مهم این است که این رنگها وابسته به اندازه و هندسهٔ نانوذرات است.

برای معرفی سازوکارهایی که موجب تغییر رنگ نانوذرات می شود، ابتدا باید سازوکارهای مختلف برهم کنش نور با یک ماده را بشناسیم. وقتی که یک پرتو نور به سمت جسمی می تابد، می تواند برهم کنش های متنوعی با این ماده داشته باشد. ممکن است ماده نسبت به نور شفاف باشد و اجازهٔ عبور نور از خود را دهد (مانند شیشه برای نور مرئی)؛ ممکن است این ماده در برابر پرتو تابانده شده شفاف نباشد و برهم کنش خاصی هم با آن نداشته باشد و عیناً آن را بازتاب دهد (مانند آینه برای نور مرئی) و درنهایت، ممکن است که نور تابانده شده به جسم برهم کنشی قوی با آن داشته باشد و برهم کنش خاصی هم با آن نداشته باشد و عیناً آن را بازتاب دهد جذب گردد (مانند اجسام سیاه رنگ برای نور مرئی).



شکل ۹: چرخ رنگی نشان دهندهٔ رنگهای مکمل

نحوهٔ برهم کنش الکترونهای یک ماده با پرتو نور، تعیین کنندهٔ سرنوشت پرتو نور تابانده شده به آن است. الکترونهای ماده میتوانند انرژی فوتونهای نور را جذب کنند\* و برانگیخته شوند (بهترازهای انرژی بالاتر منتقل شوند) یا طی برهم کنشهایی سبب بازگشت فوتونها شوند یا بدون برهم کنشی اجازهٔ عبور دهند. زمانی یک جسم میتواند رنگ مشخصی برای خود داشته باشد که بخشی از نور مرکب تابانده شده را جذب کند. اگر رنگ مشخصی از نور سفید تابانده شده به جسم جذب شود (یک طول موج مشخص)، آن جسم رنگی دیده می شود و دراصطلاح، رنگ مکمل رنگ جذب شده است؛ برای مثال، جسمی که رنگ آبی را جذب می کند، نارنجی دیده می شود. برای راحتی کار و مشخص کردن

چنین رنگهایی، مفهومی به نام چرخ رنگی <sup>۲</sup> مطرح شده است که در آن رنگهای مکمل روبهروی هم و حول یک دایره قرار دارند (شکل ۹). با توجه به تغییر ساختار الکترونیکی یک ماده در ابعاد نانو و شکافتهشدن ترازهای انرژی آن، بدیهی است که طول موجهای جذب شده توسط یک ماده هم تغییر کند و درنتیجه، رنگ نانوماده هم دچار تغییر شود. در حالت کلی، دو نوع برهم کنش متفاوت میان ماده و نور موجب می گردد که انواع نانوذرات نیمهرسانا و فلزی به رنگهای متفاوت دیده شوند. این دو برهم کنش شامل گذارهای بینواری و تشدید پلاسمون سطحی موضعی (LSPR) <sup>۲</sup> می شود که به تر تیب در تغییر رنگ نانوذرات نیمهرسانا و فلزی مؤثرند. در کنار این دو پدیده که موجب می گردند به دلیل فرایندهای جذب و نشر فوتونها، رنگ مشخصی برای نانوذرات ایجاد شود، دو پدیده دیگر هم وجود دارند که حاصل برهم کنش ماهیت موجی پر توهای نور با نانومواد است: برهم نهی یا تداخل امواج<sup>۳</sup> و پراکندگی نور<sup>1</sup> در ادامه، این چهار پدیده را دقیق تر بررسی خواهیم کرد.

- 2- Localized surface plasmon resonance
- 3- Wave interference
- 4- Light scattering

مفاهيم اوليه فناوري نانو و كاربردهاي آن در فيزيك

ٹے۔ل دوع ن**رامی مرا** 

<sup>1-</sup> Color wheel

### 🔸 گذار بین نوارهای انرژی

جذب فوتون توسط الکترونهای یک ماده، برانگیخته شدن آنها، گذار به نوارهای انرژی بالاتر و انتشار فوتونی با آسایش الکترونهای برانگیخته، فرایندی است که موجب می گردد تا مواد مختلف به رنگهای خاص خود دیده شوند (رنگ مکمل طیف جذب شده). حال اگر به هر دلیلی فاصلهٔ میان نوارهای انرژی یک ماده تغییر کند، طول موج و درنتیجه، رنگی که ماده جذب و نشر می کند دچار تغییر می شود و ماده به رنگ متفاوتی مشاهده می گردد. روند گسسته شدن نوارهای انرژی یک مادهٔ جامد تودهای با کاهش ابعاد آن را به یاد بیاورید (شکل ۶). با کاهش اندازهٔ یک نانوذره به تدریج، نوار انرژی آن در حالت تودهای شکافته می شود و حاصل آن ایجاد نوارها و شکافهای انرژی جدید است. این همان پدیده ای است که موجب می گردد مواد نانوساختار نیمه رسانا، به ویژه نقاط کوانتومی، به رنگهای متنوعی دیده شوند. نقاط کوانتومی ذرات بلورین نیمه رسانا هستند و در دمای محیط، اندازهای کمتر از ۲۰۱ دارند؛ البته با کاهش نقاط کوانتومی ذرات بلورین نیمه رسانا هستند و در دمای محیط، اندازهای کمتر از ۲۰۱ دارند؛ البته با کاهش نقاط کوانتومی این است که در این نانوساختار نیمه رسانا، به ویژه نقاط کوانتومی، به رنگهای متنوعی دیده شوند. نقاط کوانتومی این است که در این نانوساختار نیمه رسانا، به ویژه نقاط کوانتومی، به رنگهای متنوعی دیده شوند. ماه درات بزرگتر با چنین مشخصاتی (نیمه رسانا و بلورین) هم به نقطهٔ کوانتومی تبدیل می شوند. دلیل نام گذاری نقاط کوانتومی این است که در این نانوساختارها محدودشدن کوانتومی به طور کامل رخ می دهد و شکافته شدن نوارهای انرژی به نوارهای انرژی بسیار باریک کاملاً مشهود است. از این رو، پدیدههای کوانتومی، که در ابعاد کاهش یافته قابل مشاهده در این نانوساختارها کاملاً مشهود است. از این رو، پدیدههای کوانتومی، که در ابعاد کاه شیافته قابل مشاهده اند، در این نانوساختارها کاملاً مشهود است. از این رو، پدیدههای کوانتومی، موساختار الکترونیکی آنها و مشاهده مده در این نانوساختارها کاملاً مشهود دست. از این رو، رند نقاط کوانتومی، ساختار الکترونیکی آنها و استه

مقایسهٔ رنگها در شکل ۱۰ با چرخ رنگی شکل ۹ بهخوبی نشاندهندهٔ نمایان شدن رنگهای مکمل در شرایط جذب و نشر نور توسط نقاط کوانتومی است. الکترونهای نقاط کوانتومی در برهم کنش با فوتونهای نور تابانده شده به آنها برانگیخته می شوند و با یک گذار بین نواری، به نوار بالاتر می روند. نکته ای که باید به آن توجه کرد این است که شکاف انرژی میان این نوارها مقدار مشخصی دارد و با توجه به ماهیت کوانتومی نور (گسسته بودن انرژی آن) امکان برانگیخته کردن الکترونها با هر نوری ممکن نیست. هر نقطهٔ کوانتومی، بسته به اندازه ای که دارد، توسط فوتونهایی با انرژی مشخص برانگیخته می شود. بنابراین، هنگامی که نور سفید به نقاط کوانتومی تابانده می شود، با جذب یک طول موج خاص، نقاط کوانتومی به رنگ مکمل نور جذب شده ظاهر می شوند. در حالت آسایش الکترونهای برانگیخته، انرژی که با بازگشت الکترون به حالت پایه به شکل فوتون منتشر می شود، برابر شکاف انرژی است. ازاین رو، هر نقطهٔ کوانتومی، متناسب با اندازهٔ خود، پر توی با طول موج و رنگی خاص منتشر می کند.



کاهش اندازهٔ نانوذرات موجب شکافتهشدن هرچه بیشتر نوارهای انرژی میشود؛ این امر موجب میگردد تا شکاف انرژی جدید با کاهش اندازهٔ ذرات بزرگتر شود. ازاینرو، برای برانگیخته کردن الکترونهای نقاط کوانتومی کوچکتر، به فوتونهای پرانرژیتری نیاز است. به همینترتیب، نوری که نقاط کوانتومی کوچکتر آزاد میکنند از فوتونهای پرانرژیتر تشکیل میشود. پس بهعنوان قاعدهای کلی میتوان گفت که با کاهش اندازهٔ نقاط کوانتومی، رنگی که منتشر میشود به سمت طول موجهای کوتاهتر (از رنگ قرمز به سمت آبی) متمایل میشود. این پدیده را دراصطلاح، انتقال آبی<sup>۱</sup> مینامند.

نکته قابل توجه دربارهٔ شکل ۱۰ این است که فرایند برانگیزش و آسایش الکترون ها بسیار سریع رخ می دهد؛ بنابراین، در شرایط عادی امکان مشاهدهٔ نور گسیل شده وجود ندارد. از این رو، برای بررسی طیف منتشر شده از یک ماده، آن را در محیط تاریکی قرار می دهند و به آن نور فرابنفش می تابانند. در چنین محیطی که نور مرئی وجود ندارد، فوتون های منتشر شده توسط نقاط کوانتومی قابل رؤیت اند. به همین دلیل است که زمینهٔ تصویر مربوط به نور منتشر شده در شکل ۱۰ تاریک است. فرایند انتشار نور توسط الکترون های برانگیخته شده با تابش نور را پدیدهٔ فلوئور سنس<sup>۲</sup> یا پر تو تابی ماده می نامند و به موادی که این خاصیت داشته باشند، مواد فلوئور سنت<sup>۳</sup> یا پر تو تاب می گویند.

#### 🔸 پلاسمون سطحی موضعی

یکی از ویژگیهای نانومواد فلزی، خواص نوری منحصربهفرد آنهاست. این خواص از پدیدهای موسوم به تشدید پلاسمون سطحی موضعی (LSPR) ناشی میشود. به نوسان جمعی الکترونهای آزاد (الکترونهای نوار رسانش) در مواد فلزی پلاسمون میگویند. هنگامی که نور به سطح یک فلز تابیده میشود، مستقل از اندازهٔ آن فلز، بخشی از نور به موازات سطح فلز منتشر میگردد. میدان الکتریکی این موج الکترومغناطیسی \* عمق نفود بسیار کمی در تودهٔ فلز دارد و فقط میتواند الکترونهای سطحی را تحریک کند. این میدان الکتریکی در حال نوسان، بر الکترونهای ماده تأثیر میگذارد و موجب نوسان الکترونهای سطحی فلز میشود. به نوسان الکترونهای سطحی فلزات در فصل مشترک با مواد عایق، که در چنین شرایطی ایجاد میشود (جفت شدن با پرتو نور)، پلاسمون سطحی قطبیده<sup>†</sup> گفته میشود. نوسان حاملهای بار الکتریکی (الکترونها) یک میدان الکترومغناطیسی ایجاد میکند. موج الکترومغناطیسی حاصل از چنین نوساناتی را

با جذب نور و شکل گیری پلاسمون سطحی قطبیده، الکترونهایی که به سبب جذب انرژی از پرتو نور به حالت نوسان درآمدهاند، یک میدان الکترومغناطیسی در بیرون و درون فلز ایجاد و از این طریق انرژی مازاد خود را دفع می کنند. بخش بزرگی از این انرژی بهصورت نور بازتاب میشود و از سطح فلز نمایان می گردد؛ ازاینرو، بیشتر فلزات پس از صیقل کاری، سطحی آینهای دارند. بخش دیگر نیز بهصورت نوسانات میرا در تودهٔ فلز پخش می گردد. به چنین پلاسمونهایی، پلاسمونهای سطحی پخششونده<sup>6</sup> می گویند. این نوسانات بسیار کم انرژی اند و با عمق اثری حدود چند نانومتر، در عمل تأثیر چندانی بر الکترونهای درونی ندارد؛ ازاینرو، با ایجاد پلاسمون سطحی در یک فلز تودهای پدیده خاصی در تودهٔ فلز مشاهده نمیشود (شکل ۱۱).

- 1- Blue shift
- 2- Fluorescence
- 3- Fluorescent
- 4- Polarized surface plasmon
- 5- Propagating surface plasmon



شکل گیری پلاسمونهای سطحی قطبیده در ابعاد نانو متفاوت از حالت تودهای است. با کاهش اندازهٔ ذرات فلزی و قرارگیری آنها در محدودهٔ تعریفشدهٔ نانومواد، اندازهٔ ذره از طولموج نور مرئی، که به ذره می تابد (۳۰۰ – ۲۰۰ )، کوچک تر می شود. این امر موجب می گردد تا کل نانوذره در عمق نفوذ میدان الکتریکی پر تو نور قرار گیرد. در نتیجه، نه تنها الکترونهای سطح بلکه همهٔ الکترونهای موجود نانوذرات تحت تأثیر میدان الکتریکی حاصل از پر تو ورودی قرار می گیرند و به حالت نوسان درمی آیند (شکل ۱۲). در چنین شرایطی، پلاسمون ایجادشده در نانوذره نه تنها سطح بلکه کل نانوذره را دربرمی گیرد و موجب می شود که تمام الکترونهای نانوذره به حالت نوسان هماهنگ درآیند.

پلاسمونهای ایجادشده در مسیری هماهنگ در کل نانوذره، نوسانات رفتوبرگشتی میکنند. از آنجاکه این پدیده به طورموضعی فقط درون نانوذره نوسان میکند، به آن پلاسمون سطحی موضعی (LSP)<sup>۱</sup> میگویند. الگوی نوسانات رفت و برگشتی الکترونها، علاوه بر جنس نانوذرات فلزی، با شکل و هندسهٔ آنها هم ارتباط داد. این عوامل موجب می شوند تا پلاسمونهای سطحی موضعی می اندزاره ارتباط مستقیم دارد، می شوند تا پلاسمونهای سطحی موضعی بعاوند با بسامدی مشخص، که با اندازه و شکل نانوذره ارتباطی مستقیم دارد، می شوند تا پلاسمونهای سطحی موضعی در د. این عوامل موجب می شوند تا پلاسمونهای سطحی موضعی بتوانند با بسامدی مشخص، که با اندازه و شکل نانوذره ارتباطی مستقیم دارد، نوسان کنند. اگر بسامد این نوسانات با بسامدی مشخص، که با اندازه و شکل نانوذره ارتباطی مستقیم دارد، رخ می دهد که به آن تشدید پلاسمونها با نور فرودی رخ می دهد که به آن تشدید پلاسمون ساحی موضعی (LSPR) می گویند. می شود، پدیدهٔ تشدید پلاسمونها با نور فرودی رخ می دهد که به آن تشدید پلاسمون سطحی موضعی (LSPR) می گویند. می توند یک شود یک نو نوانات با بسامدی با به ماد یک شود، پدیدهٔ تشدید پلاسمونها با نور فرودی رخ می دهد که به آن زمن که به آن تشدید پلاسمونها با نور فرودی رخ می دهد که به آن زمان کند. اگر بسامد این نوسانات با بسامدی برابر با بسامد تشدید پلاسمونی نانوذرات دارد، جذب می کند و رنگی نانوذرات فلزی بخشی از نور مرئی را، که بسامدی برابر با بسامد تشدید پلاسمونی نانوذرات دارد، جذب می کند و رنگی متفور تا ز رنگ حالت تودهای فلزات در ابعاد نانو پدیدار می شود.



وحسال روع

واص مواد



تغییرات نسبت منظر از ۱/۵ الی ۲۰ است [۱۷]

تغییر رنگ نانوذرات طلا مثال مشهوری از تغییر رنگ انواع نانوذرات فلزی تحت تأثیر پدیدهٔ پلاسمون سطحی موضعی است. رنگ نانوذرات فلزی ارتباط مستقیمی با شکل و اندازه آنها دارد؛ زیرا تعیین کنندهٔ طول موجی است که موجب می شود پلاسمون های سطحی تشدیدشده در آنها شکل بگیرد. اگر نانوذرات فلزی شکل متقارنی مانند کره داشته باشند، الکترون های آنها فقط با یک طول موج مشخص جفت می شوند و پلاسمون سطحی ایجاد می کنند. همچنین، اگر نانوذرات ساختار کشیده داشته مانند میله باشند، الکترون ها امکان نوسان پلاسمونی در دو راستای عرضی و طولی را خواهند داشت؛ درنتیجه، این نانوذرات توان جذب و نشر همزمان دو طول موج را خواهند داشت و به رنگی که ترکیبی از این دو رنگ است، رؤیت می شوند (شکل ۱۳).

شکل گیری پلاسمونهای سطحی در سطح فلزات رخ میدهد؛ بنابراین، طول موجی که سبب ایجاد این پلاسمونها می شود، علاوه بر شکل و اندازهٔ نانوذرات فلزی، به محیط پیرامون نانوذرات و گونههایی که بر روی سطح آنها جذب می شود هم وابسته است. این امر موجب می گردد که با جذب کردن یا جداشدن انواع مولکول ها از سطح نانوذرات فلزی، طول موج جذب آنها تغییر کند و درنتیجه، رنگ شان نیز تغییر یابد. این ویژگی باعث شده است که نانوذرات فلزی در آشکار سازی انواع ترکیب های شیمیایی و زیستی کاربرد فراوانی داشته باشند.

ٹےل لوع **خواص مواد** 

مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك

## 🔸 برهمنهی امواج

یکی از پدیدههایی که همواره در طبیعت جلبتوجه میکند و هر بینندهای را مسحور خود میسازد، رنگهای زیبا و بیهمتای موجود در طبیعت است؛ مانند بال رنگین پروانهها، پر طاووس و بسیاری از پرندگان رنگین بال و حشراتی که پوست رنگین و براق دارند. جالبترین مسئلهای که هنگام تماشای این زیباییها در طبیعت با آن روبهرو میشویم این است که این رنگهای زیبا با تغییر زاویهٔ دید تغییر میکنند. بالهای پروانهای موسوم به پروانه مورفو<sup>(</sup> مثالی از این تغییر رنگ است (شکل۱۴).



شکل ۱۴: تصویرهایی از بال پروانهٔ مورفو در شرایط مختلف: (آ) روبهرو، (ب) موازات سطح، (پ و ت) تصویر روبهرو و مورب از بال غوطهور در اتانول مایع و (ث و ج) تصویر روبهرو و مورب از بال خشک پیش از غوطهوری [۱۸]

رنگ یک شاخه گل سرخ را در نظر بگیرید رنگ این گل، فارغ از روز و شب بودن یا نوع نوری که به آن می تابد یا زاویهٔ دید فرد نظاره گر، همواره ثابت است. این رنگ ناشی از ترکیبهای شیمیاییای است که روی سطح گلبرگها حضور دارند. این مولکولهای رنگی را رنگدانه مینامند. با وجود این رنگهایی که با تغییر زاویهٔ دید تغییر میکنند، مانند رنگ بال پروانهٔ مورفو، ناشی از رنگدانه نیستند بلکه وجود نانوساختارهای طبیعی بر روی سطوحی مانند بال این پروانه است که سبب شکل گیری این رنگهای زیبا و متنوع می شود (شکل ۱۵). چنین رنگهایی را که ناشی از ریزساختارهای روی سطحاند رنگ ساختاری<sup>۲</sup> می نامند.

براساس شکل(۱۵- ب)، پوستههای کوچک روی بال پروانه ساختار هندسی خاص در ابعاد نانو دارند. نور از طریق پنجرههای کوچک و نانومتری روی سطح (شکل ۱۵-ت)، وارد ساختار میشود و بازتاب مییابد پرتوهای نور بازتابیدهشده از این ساختارهای نانومقیاس با یکدیگر تداخل میکنند و موجب پیدایش این رنگهای زیبا میشوند.

به بیان ساده، برهمنهی یا تداخل امواج<sup>\*</sup> زمانی رخ میدهد که دو یا چند موج مختلف بهطور همزمان به یک نقطه برسند. در چنین شرایطی، بسته به اینکه امواج در لحظهٔ رسیدن به هم چه شرایطی داشته باشند، ممکن است در نقطهٔ برخورد با تقویت یکدیگر موجی بزرگتر ایجاد کنند یا با تضعیف یکدیگر، به شکلگیری موج ضعیفتری منجر گردند. شکل ۱۶ طرحی ساده از پدیدهٔ برهمنهی امواج را نشان میدهد.

<sup>2-</sup> Structural color



الکترونی روبشی از (پ) پوستههای کوچک روی بال، (ت) بزرگ نمایی از ساختار سطحی یک پوسته، (ث) ساختار درونی یک پوسته و (ج) طرحی رایانهای از ساختار درونی یک پوسته [۱۹]

در سادهترین حالت ممکن، اگر در لحظهٔ رسیدن دو موج به هم قلههای امواج بر هم منطبق باشند، این دو موج یکدیگر را تقویت میکنند و موجی با دامنهای به بزرگی مجموع دامنهٔ دو موج میسازند (برهمنهی سازنده) و اگر قلهٔ یک موج بر قعر موج دیگر منطبق گردد، این دو موج یکدیگر را تضعیف میکنند و دامنهٔ موج حاصل برابر با تفاضل دامنهٔ دو موج خواهد بود (برهمنهی ویرانگر).

این امر که آیا قلههای دو موج هنگام عبور از یک نقطه بر هم منطبق است یا خیر را با مفهومی موسوم به فاز موج و اختلاف فاز میان دو موج تداخل کرده بیان میکنند. بهاینصورت که اگر قلههای دو موج بر هم منطبق باشند، این دو موج همفاز و اگر قلههای دو موج بر هم منطبق نباشند، ناهمفاز نامیده میشوند.

هنگامی که پرتوهای نور به ساختار درون پوستههای بال پروانه وارد می شوند، انگشتی های نانوساختار آنها را منعکس می کنند. ضخامت هر انگشتی حدود ۳n ۶۰ و فاصلهٔ میان آنها حدود ۳n ۱۲۰ است. درنتیجه، پرتو نوری که از انگشتی زیرین منعکس می شود مسافت بیشتری را طی می کند. این اختلاف مسافت طی شده منجر به ایجاد اختلاف فاز میان این پرتوها می شود و درنتیجه، به برهم نهی آنها می انجامد. این تداخل، بسته به طول موج پرتو، می تواند سازنده یا ویرانگر باشد (شکل ۱۷). از آنجاکه نور مرئی ترکیبی از انواع پرتوهای رنگی با طول موجهایی در محدودهٔ ۳۰ ۲۰۰ است، با تابش نور مرئی به چنین ساختارهایی و ایجاد تداخل های سازنده و مخرب برخی رنگها تقویت می شوند و برخی رنگها نیز حذف می گردند. درنتیجه، این ساختار موجب ایجاد رنگی می شود که حاصل از رنگدانه نیست و زاویهٔ تابش پرتو هم موجب می شود مسافت طی شدهٔ بین انگشتی ها تغییر کند و درنتیجه، منجر به تداخل می شود. از این رو، با تغییر زاویهٔ تابش نور به این نانوساختارها یا تغییر زاویهٔ دید ناظر، هم زمان رنگهای مختلفی قابل می شود. از این رو ای ای این انگری با طول موجهای منجر به تداخل می شود. و زاویهٔ تابش

مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك



چنین سازوکاری، رنگهای متنوعی از موجودات زنده، ازجمله بال پرندگان و پوسته یا بال حشرات، دیده می شود. طاووس یکی از پرندگانی است که بهسبب پرهای رنگین و زیبای خود مشهور است؛ پرهای طاووس هم بهسبب ساختارهای نانومقیاس رنگین دیده می شوند. شکل ۱۸ ساختار پرهای طاووس را نشان می دهد. در پرهای طاووس آرایهای از نانومیله ها موجب تداخل پرتوهای نور می شود و رنگهای زیبایی ایجاد می کند.



رایانهای از آرایهٔ نانومیلههای موجود در پر طاووس که عامل ایجاد رنگ ساختاریاند [۱۹]

ثتمال لاوم **خواص مواد** 

## 🛧 پراکندگی نور

پراکندگی ٔ پدیدهای فیزیکی است که در آن یک موج به دلیل وجود غیریکنواختی موضعی در محیط، مجبور می شود مسیر مستقیم خود را تغییر دهد. پدیدهٔ پراکندگی همواره در محیط پیرامون ما در حال رخ دادن است. نمود عینی پراکندگی پرتوهای نور زمانی است که در یک اتاق تاریک، کمنور یا غبارآلود باریکهای نور تابیده شود. در این شرایط، مسیر حرکت نور با درخششهای لحظهای و تصادفی روشن می شود. این در حالی است که اگر به جای تاباندن باریکهای نور کل اتاق را روشن کنیم، این نقاط درخشان دیگر قابل مشاهده نخواهند بود.

این درخششهای لحظهای ناشی از پراکندگی یا انعکاس غیرمنظم پرتو نور در مسیرهای تصادفی است و برآیند آنها مسیر تابش باریکهٔ نور را نشان میدهد. نکتهٔ جالب اینجا ست که این ذرات بسیار کوچکتر از آناند که با چشم غیرمسلح دیده شوند؛ بااینحال، اثر نوری ناشی از وجود آنها (پراکندگی) قابل مشاهده است. به همین ترتیب، نانوذرات در اندازههای مختلف میتوانند از پرتو نور تابانده شده به محیط انعکاسی غیر منظم داشته باشند و طول موجهای متفاوتی را پراکنده کنند. چنین پدیده ای، بهویژه هنگامی رخ میدهد که نانوذرات در یک محیط مایع معلق باشند. نانوذرات به دلیل اندازهٔ بسیار کوچکی که دارند، در محیط مایع قابل مشاهده نخواهند بود و در صورت شفاف بودن مایع، مخلوط حاصل نیز شفاف خواهد بود. در چنین شرایطی، اگر باریکه نور تقویت شده ای مانند پرتو لیزر به محیط تابانده شود، مسیر عبور پرتو از درون این محیط شفاف شروع به درخشش خواهد کرد. این درخشش حاصل پراکندگی غیر منظم نور عبوری توسط نانوذرات است. این پدیده با نام اثر تیندال<sup>۲</sup> شناخته می شود. شکل ۱۹ نشان دهندهٔ نحوهٔ پراکنش باریکهٔ لیزر سبزرنگ توسط نانوذرات است. این پدیده با نام اثر تیندال



در چنین شرایطی، نانوذرات رنگی از خود بروز نمیدهند و فقط پرتو تابیدهشده را پراکنده میکنند؛ ازاینرو، باریکهٔ مشاهدهشده درون محیط مایع به رنگ پرتو اصلی خواهد بود.

برایناساس، نمیتوان از پدیدهٔ پراکندگی برای مشاهدهٔ مستقیم نانوذرات استفاده کرد بلکه میتوان آن را بهعنوان ابزاری برای آگاهی از حضور ذرات بسیار کوچک و غیرقابلمشاهده در یک محیط به کار برد. شدت پراکندگی نور ارتباط مستقیمی با اندازهٔ ذرات دارد.

1- Scattering

2- Tyndall effect

۵٣

💿 کاهش دمای ذوب نانوذرات

پیش از این بیان شد که با کاهش ابعاد در یک نانوماده، سطح ویژهٔ آن افزایش مییابد. این افزایش سطح ویژه موجب انباشت انرژی سطحی زیادی در نانومواد میشود که عامل اصلی ناپایداری و فعالیت بسیار بالای شیمیایی آنهاست. کاهش ابعاد یک ماده و ایجاد سطح جدید به صرف انرژی نیاز دارد، مانند انرژی صرفشده برای شکستن و خردکردن یک حبه قند و تبدیل آن به پودر قند. انرژی صرفشده، که موجب شکستن پیوندهای میان اتمها و مولکولهای ماده و کوچکترکردن آنها می گردد، بر روی سطح ذرات جدید انباشت میشود که به آن انرژی سوخب ناپایداری نانوذرات و انرژی سطحی بهعنوان کار انجامشده برای ایجاد واحد سطح تعریف میشود. این انرژی موجب ناپایداری نانوذرات و تمایل شدید آنها به انجام واکنش شیمیایی میشود.

مقدار انرژی سطحی نانو ذرات به نسبت اتمهای موجود در سطح به کل اتمها بستگی دارد. با توجه به سطح بالای انرژی سطحی و عدم پایداری نانوذرات فلزی، می توان به راحتی و با اندکی تزریق انرژی، اتمهای چنین ذراتی را از قید ساختار جامد ذره آزاد کرد. مفهومی موسوم به انرژی چسبندگی<sup>(</sup> برای مواد جامد تعریف می شود که برابر است با انرژی موردنیاز برای آزادسازی اتمهای سازندهٔ آن به صورت اتمهای آزاد. با توجه به تعریف انرژی چسبندگی، مشخص می شود که دمای ذوب مواد ار تباط مستقیمی با انرژی چسبندگی آنها دارد. همچنین، ثابت شده است که انرژی چسبندگی نانوذرات ار تباط مستقیمی با نسبت اتمهای سطحی آنها دارد؛ با توجه به اینکه درصد اتمهای سطحی تابعی از اندازهٔ نانوذرات است (شکل ۸)، لذا انرژی چسبندگی هم تابعی از اندازهٔ آنهاست. این امر موجب می گردد تا دمای ذوب نانوذرات نیز به اندازهٔ آنها وابسته شود.

مدلهای متنوعی برای توصیف رفتار وابسته به اندازهٔ انرژی چسبندگی و دمای ذوب نانومواد ارائه شده است. بیشتر این مدلها ساختار یکسانی دارند و فقط در برخی جزئیات با یکدیگر متفاوتاند. بهطورکلی، میتوان انرژی چسبندگی در ابعاد نانو را بهعنوان تابعی از اندازهٔ مشخصهٔ نانومادهٔ موردمطالعه به شکل زیر محاسبه کرد:

$$E_c = E_{cb} \left( 1 - \frac{\beta}{D} \right) \tag{(a)}$$

در رابطهٔ فوق <sub>E</sub> برابر انرژی چسبندگی نانوذره، E<sub>cb</sub> انرژی چسبندگی حالت تودهای، D قطر نانوذره و β ثابتی است که برای هر ماده باید تعیین گردد. تفاوت میان مدلهای مختلف ارائهشده برای پیش بینی دمای ذوب نانوذرات در نحوهٔ تعیین β است. در یکی از سادهترین مدلهای ارائهشده برای پیش بینی دمای ذوب نانوذرات، رابطهٔ زیر پیشنهاد شده است:

$$E_c = E_{cb} \left( 1 - \frac{2d}{\eta D} \right) \tag{(?)}$$

در رابطهٔ فوق d برابر قطر اتمهای سازندهٔ نانوذره و η ضریب فشردگی ساختار بلوری نانوذره است. براساس رابطههای ۵ و ۶، رابطهای برای پیش بینی دمای ذوب نانوذرات ارائه شده است که تقریباً با دقت قابل قبولی می تواند دمای ذوب نانوذرات فلزی مختلف را پیش بینی کند:

$$T_{mD} = T_{mb} \left( 1 - \frac{\beta}{D} \right) \tag{V}$$

$$T_{mD} = T_{mb} \left( 1 - \frac{2d}{\eta D} \right) \tag{A}$$

1- Cohesive energy

نواص مواد

در رابطهٔ فوق T<sub>m</sub> دمای ذوب وابسته به اندازه و T<sub>m</sub> دمای ذوب حالت تودهای ماده است. تاکنون مدلهای بسیاری از این دست برای پیش بینی دمای نانوذرات ارائه شده است. در اکثر این مدلها، نانوذرات را ذراتی کروی با سطحی همگن فرض کرده اند. بیشتر مدلهای ارائه شده حالتی مشابه رابطهٔ ۷ دارند؛ ازاین رو، پژوهش های بسیاری برای پیش بینی یا اندازه گیری β برای عناصر مختلف صورت گرفته است. شکل ۲۰ نتایج حاصل از رابطهٔ ۸ برای نانوذرات کروی طلا با ساختار بلوری مرکزوجه پر (FCC) را با داده های تجربی مقایسه می کند. برای رسم نمودار شکل ۲۰، ضریب فشرد گی برابر ۰/۷۴، قطر اتم های طلا ۱۳



مقایسهٔ چگونگی کاهش دمای ذوب نانوذرات، بهعنوان تابعی از قطر نانوذرات (شکل ۲۰) با افزایش درصد اتمهای سطحی از طریق کاهش اندازهٔ نانوذرات (شکل ۸)، بهخوبی نشاندهندهٔ ارتباط بین اتمهای سطحی و دمای ذوب ذرات است. برایناساس، افزایش هر چه بیشتر درصد اتمهای سطحی موجب می گردد تا دمای ذوب نانوذرات کاهش یابد.

## 💿 تغییر خواص مغناطیسے نانوذرات

خاصیت مغناطیسی یکی از مهمترین ویژگیهایی است که برخی مواد از خود نشان میدهند. این خاصیت سبب شده است مواد مغناطیسی، که امروزه از اهمیت بسیاری برخوردارند، کاربردهای متنوعی داشته باشند. اگر به اطراف خود نگاه کنید، با وسایل بسیاری روبهرو میشوید که در ساخت آنها از مواد مغناطیسی و یا خواص مغناطیسی استفاده شده؛ مانند بلندگوها، حافظههای مغناطیسی، درب یخچال و موتورهای الکتریکی. در کاربردهای پزشکی و حسگرها و بسیاری از زمینههای دیگر نیز از مواد مغناطیسی استفاده میشود. برای صحبت دربارهٔ تغییر خواص مغناطیسی در مقیاس نانو باید به طورخلاصه خواص مغناطیسی مواد معمولی را بررسی کنیم.

#### 🔸 مواد مغناطیسی

پیش از بحث دربارهٔ ریشهٔ خواص مغناطیسی مواد مختلف، باید این نکته مهم را مدنظر قرار دهید که الکتریسیته و مغناطیس دو پدیده جدا از هم نیستند و کاملاً درهمتنیده شدهاند. پیش از این، با امکان تولید جریان الکتریسیته از طریق حرکت یک آهنربا درون یک پیچه آشنا شدهاید یا ایجاد میدان مغناطیسی توسط یک پیچه را، که از آن جریان الکتریکی عبور می کند، مشاهده کردهاید. این پدیدهها ماهیت درهمتنیدهٔ الکتریسیته و مغناطیس را نشان میدهند. برای آگاهی از اینکه خاصیت مغناطیسی ذاتی مواد از چه چیزی ریشه می گیرد، مثال ایجاد میدان مغناطیسی در اثر عبور جریان الکتریکی از یک سیم را به یاد آورید<sup>\*</sup> (شکل ۲۱–آ). میدانیم که حرکت الکترونها در جهت مشخصی درون سیم موجب ایجاد میدان مغناطیسی در اطراف یک سیم میشود؛ همچنین، میدانیم که با معکوس شدن جهت جریان الکتریکی، جهت میدان مغناطیسی هم معکوس می شود. حال ساختار اتم را به یاد آورید؛ میدانیم هر اتم از هسته ای با بارالکتریکی مثبت تشکیل شده است که در مرکز آن قرار دارد و تعدادی الکترون در اطراف هسته در حال چرخش اند. اگر مسیر حرکت الکترون ها را در اطراف هسته مسیری مشخص فرض کنیم، این مسیر را می توان به عنوان یک حلقهٔ جریان (مشابه شکل ۲۱ – آ) در نظر گرفت (شکل ۲۱ – ب). براین اساس می توان انتظار داشت که از چرخش الکترون ها به دور هسته میدان مغناطیسی تولید شود. الکترون ها علاوه بر چرخش به دور هسته (حرکت انتقالی)، به دور خود نیز می چرخند (اسپین) ( حرکت وضعی)؛ هر دو این حرکت ها آثار مغناطیسی دارند.



شکل ۲۱: (آ) میدان مغناطیسی ایجادشده در اثر عبور جریان الکتریکی از یک سیم حلقوی و (ب) میدان مغناطیسی حاصل از حرکت الکترون به دور هستهٔ اتم و خودش

شاید این سؤال پیش بیاید که اگر حرکت همهٔ الکترونهای موجود در اتمهای ماده آثار مغناطیسی دارند، چرا همهٔ مواد از خود آثار مغناطیسی نشان نمیدهند و با آهنربا برهمکنش ندارند؟ پاسخ این است که در ساختار اتمی عناصر مختلف، بهجز چند عنصر خاص، توزیع الکترونها در اطراف هسته بهگونهای است که موجب میشود برآیند اثر مغناطیسی یک اتم صفر باشد؛ درنتیجه، عناصر محدودی رفتار مغناطیسی ذاتی از خود نشان میدهند. برایناساس، در میان عناصر فقط آنهایی از خود خاصیت ذاتی مغناطیسی نشان میدهند که توزیع الکترونها در اطراف هستهٔ اتم امکان شکل گیری برآیند خالص از میدان مغناطیسی را فراهم کند.

میان عناصر جدول تناوبی، سه عنصر آهن (Fe)، کبالت (Co) و نیکل (Ni) شناخته شده ترین عناصری اند که خاصیت مغناطیسی دارند. اگر به ساختار الکترونیکی این عناصر نگاه کنیم، نکتهٔ مشترک آنها وجود الکترون هایی است که به صورت منفرد در اوربیتال های تراز b توزیع شده اند. این توزیع الکترون شرایطی را پیش می آورد که بر آیند میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط الکترون های معن در در نتیجه، ماده خاصیت مغناطیسی پایداری دارد. در کنار این سه معنصر، برخی از عناصر، که در گروه عناصر نادر خاکی قرار دارند و دارای الکترون های جفت شده در اوربیتال های تراز b توزیع شده اند. این توزیع الکترون شرایطی را پیش می آورد که بر آیند میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط الکترون ها صفر نشود؛ در نتیجه، ماده خاصیت مغناطیسی پایداری دارد. در کنار این سه عنصر، برخی از عناصر، که در گروه عناصر نادر خاکی قرار دارند و دارای الکترون های جفت نشده در اوربیتال های تراز f هستند، هم خاصیت مغناطیسی پایداری (Sm) مشهور ترین عناصر نادر خاکی قرار دارند و دارای الکترون های و سامریم (Sm) مشهور ترین عناصر نادر خاکی قرار دارند و دارای الکترون های و سامریم (Sm) مشهور ترین عناصر نادر خاکی قرار دارند و دارای الکترون های جفت شده در اوربیتال های عنصر، برخی از عناصر، که در گروه عناصر نادر خاکی قرار دارند و عنصر نئودنیوم (Nd) و ساماریم (Sm) مشهور ترین عناصر نادر خاکی در از در در عنصر نئودنیوم (Nd) و ساماریم (Sm) مشهور ترین عناصر نادر خاکی از از می دهند. دو عنصر نئودنیوم (Nd) و ساماریم (Sm) مشهور ترین می دار در داخاکی در می دور می دور در داخاک در در داخاک و سامریم (Sm) می می دار در خاکی در حاصیت مغناطیسی بیدار از خود بروز می دهند. دو عنصر نئودنیوم (Nd) و ساماریم (Sm) مشهور ترین می داسر دادر خاکی اند که خاصیت مغناطیسی بیدار قدر تمندی دارند.

می توان هر اتمی را که خاصیت مغناطیسی ذاتی دارد یک آهن بای بسیار کوچک یا یک دوقطبی مغناطیسی فرض کرد. نحوهٔ قرار گرفتن این اتمها در کنار هم و درنتیجه، برآیند میدان مغناطیسی حاصل، نقش بسزایی در شکل گیری خواص مغناطیسی کلی آن ماده دارد. براساس نحوهٔ قرار گیری دوقطبیهای مغناطیسی در کنار هم، پاسخ مواد به میدان مغناطیسی از الگوهای متفاوتی پیروی می کند که به آنها رفتارهای مغناطیسی می گویند. در ادامه، به نحوهٔ شناسایی و طبقهبندی این رفتارها اشاره می کنیم. این پنج رفتار مغناطیسی عبارتاند از رفتار دیامغناطیس، <sup>۲</sup> پارامغناطیس، <sup>۲</sup> وحساك روع

نواص مواد

<sup>1-</sup> Spin

<sup>2-</sup> Diamagnetism

<sup>3-</sup> Paramagnetism

فرومغناطيس، پادفرومغناطيس، و فرىمغناطيس .

**مواد دیامغناطیس**: مواد دیامغناطیس موادیاند که برآیند خاصیت مغناطیسی اتمهای آنها صفر است؛ درواقع، هیچیک از اتمهای این مواد دوقطبی مغناطیسی خالص ندارند ولی حضور میدان مغناطیسی قوی خارجی میتواند سبب القای دوقطبیهای مغناطیسی در خلاف جهت میدان خارجی در این مواد شود؛ بنابراین، میدان مغناطیسی مواد دیامغناطیس را پس میزند. عناصری نظیر مس، نقره و سرب ازجمله مواد دیامغناطیس محسوب میشوند.

مواد پارامغناطیس: اتمهای مواد پارامغناطیس خاصیت دوقطبی دارند اما دوقطبیهای حاصل از آنها دارای جهت گیری تصادفی (کاتورمای) است؛ ازاینرو، نمی توانند میدان مغناطیسی خالصی ایجاد کنند (شکل ۲۲- آ). دوقطبیهای مغناطیسی اتمهای تشکیل دهندهٔ این مواد در حضور میدانهای مغناطیسی قوی (در مجاورت یک آهنربای قوی)، تاحدی با میدان مغناطیسی همراستا می شوند و خاصیت مغناطیسی ضعیف و موقتی پیدا می کنند. عناصری مانند پلاتین، آلومینیوم و اکسیژن پارامغناطیساند.

**مواد فرومغناطیس**: مواد فرومغناطیس از اتمهایی تشکیل شدهاند که خاصیت مغناطیسی ذاتی و پایدار دارند. علاوه بر وجود اتمهایی با خاصیت مغناطیسی، جهتگیری این اتمها در فضای محدودی از ساختار ماده به گونهای است که برآیند دوقطبیها یکدیگر را تقویت میکنند (شکل ۲۲- ب). در این شرایط، تعداد بسیاری از این دوقطبیها در یک دانه در کنار هم و در یک جهت مغناطیسی قرار میگیرند. این دانهها جهتگیری مغناطیسی مشخصی دارند دراصطلاح، حوزه مغناطیسی<sup>1</sup> نامیده می شوند. مواد فرومغناطیس تودهای تعداد زیادی از این دانهها دارند. حوزههای مغناطیسی مواد فرومغناطیس از طریق قرار گرفتن در یک میدان مغناطیسی خارجی با میدان هم جهت می شوند؛ به این ترتیب حجم حوزههای هم جهت با میدان مغناطیسی خارجی افزایش می یابد و مادهٔ فرومغناطیسی خاصیت مغناطیسی پیدا میکند. عناصری مانند آهن، نیکل و کبالت از جمله مواد فرومغناطیساند.



سکل ۱۱: جهت دیری دوقطبیهای معناطیسی در یک ماده (۱) پارامعناطیس و (ب) قرومعناطیس

مواد فرومغناطیس براساس نحوهٔ تغییر حوزههای مغناطیسی در اثر میدان مغناطیسی خارجی، به دو گروه فرومغناطیس سخت و فرومغناطیس نرم تقسیم میشوند. حوزههای مغناطیسی مواد فرومغناطیس سخت با قرار گرفتن در میدان مغناطیسی خارجی، به سختی تغییر جهت می دهند و با میدان بیرونی هم سو می گردند. پس از حذف میدان خارجی، بخشی از این حوزهها، که همراستای میدان خارجی شدهاند، به حالت قبلی خود بازنمی گردند و درنتیجه، ماده برای زمان طولانی دارای خاصیت مغناطیسی می شود. چنین موادی برای ساخت آهن رباهای دائم مناسب اند. این در حالی است که در مواد فرومغناطیس نرم با اعمال میدان مغناطیسی خارجی، حوزهها به راحتی با میدان همراستا و هم جهت می شوند و پس از حذف میدان، به سرعت به حالت پیش از اعمال میدان برمی گردند و خاصیت مغناطیسی خود را تا

- 1- Ferromagnetism
- 2- Antiferromagnetism
- 3- Ferrimagnetism
- 4- Magnetic domain

مفاهيم اوليه فناوري نانو و كاربردهاي آن در فيزيك

گتے۔ ل) لروج خواص مواا اگر به یک مادهٔ فرومغناطیس نرم میدان مغناطیسی ضعیف اعمال شود، جهت بسیاری از حوزههای مغناطیسی با میدان هم سو می گردد. با اعمال یک میدان قوی، تمام حوزههای مغناطیسی آن با میدان هم جهت می شوند و کل ماده یک حوزهٔ واحد می یابد (شکل ۲۳)؛ این حالت را دراصطلاح، اشباع مغناطیسی ماده می نامند. حوزههای مغناطیسی مواد فرومغناطیس نرم به سرعت با میدان مغناطیسی هم جهت می شوند و به اشباع می رسند. معمولاً، در این مواد در حالت اشباع مغناطیسی، همهٔ حوزههای مغناطیسی با میدان خارجی هم راستا هستند و کل ماده به یک حوزهٔ مغناطیسی تبدیل شده است. چنین موادی برای ساخت تجهیزاتی که به خاصیت آهن ربایی موقت نیاز دارند مفید است؛ مانند آهنرباهای الکتریکی.



شکل ۲۳: جهت گیری دوقطبی های مغناطیسی در یک فرومغناطیس نرم در شرایط مختلف

مواد پادفرومغناطیس: مواد پادفرومغناطیس موادیاند که دوقطبیهای مغناطیسی آنها، علی رغم اینکه همراستا هستند، در جهت مخالف هم آرایش دارند و اثر یکدیگر را خنثی میکنند (شکل ۲۴-آ). ازاین رو، این مواد در شرایط عادی خاصیت مغناطیسی ندارند ولی اگر در میدان مغناطیسی قرار گیرند، دوقطبیهای همسو با میدان تقویت می شوند و ماده خاصیت مغناطیسی ضعیفی از خود نشان می دهد. مواد پادفرومغناطیس با افزایش دما و رسیدن به دمای خاصی که به دمای نیل <sup>(</sup> معروف است، به پار امغناطیس تبدیل می شوند. دوقطبیهای مغناطیسی در دماهایی بالاتر از دمای نیل نظم خود را از دست می دهند و جهت گیری تصادفی پیدا می کنند. موادی مانند آلیاژ آهن – منگنز (FeMn) و اکسید نیکل (NiO) از جمله مواد آنتی فرومغناطیس اند.

مواد فری مغناطیس: آرایش دوقطبی های مغناطیسی (راستا و جهت) در مواد فری مغناطیس مشابه مواد پادفرومغناطیس است؛ با این تفاوت که قدرت دوقطبی ها در یک راستا کمتر است (شکل ۲۴-ب). ازاینرو، مواد فری مغناطیس خاصیت مغناطیسی ذاتی دارند. اکسید آهن (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) قدیمی ترین مادهٔ شناخته شده با خاصیت فری مغناطیسی است.



#### 🔸 پسماند مغناطیسی

همان طور که بیان شد، بسیاری از مواد فرومغناطیس با حذف میدان مغناطیسی خاصیت مغناطیسی خود را بهطور کامل از دست نمی دهند؛ به این ویژگی، اثر پسماند مغناطیسی<sup>۲</sup> می گویند. در واقع، اثر پسماند مغناطیسی تمایل یک ماده برای به خاطر آوردن تاریخچهٔ مغناطیسی خود است. برای رسیدن به یک مادهٔ مغناطیسی با اثر پسماند و برای بازگرداندن خواص مغناطیسی اولیه و از بین بردن آثار میدان اعمال شده، به میدانی با وسعت مشخص و در خلاف جهت

1- Néel temperature

2- Magnetic hysteresis

وحسال ولألح

نواص مواد

ميدان پيشين نياز داريم. اين ميدان مغناطيسي وادارندگي مغناطيسي ٰ نام دارد. براي تشريح رفتار مغناطيسي يک ماده، حین اعمال میدان مغناطیسی به آن، منحنیای موسوم به منحنی پسماند مغناطیسی رسم میشود. این منحنی نشاندهندهٔ مغناطیسی شدن یا مغناطش ماده بهعنوان تابعی از نیروی مغناطیسی اعمال شده به ماده است (شکل ۲۵). با اعمال ميدان مغناطيسي به يک مادهٔ مغناطيسي (فرومغناطيس يا يارامغناطيس)، دوقطبي هاي مغناطيسي ماده بهتدریج، شروع به همراستاشدن با میدان خارجی میکنند و درنتیجه، حوزههای مغناطیسی همجهت با میدان ایجاد می شوند. حاصل این برهم کنش افزایش مغناطش ماده است. با افزایش شدت میدان مغناطیسی اعمالی مغناطش ماده به مقدار نهایی خود می سد (اشباع مغناطیسی – M<sub>e</sub>, ا کاهش میدان خارجی، بسته به نوع ماده، بخش زیادی از دوقطبیهای مغناطیسی و درنتیجه، حوزههای مغناطیسی به حالت پیشین خود بازمیگردند؛ با اینوجود بخشی از دوقطبیهای مغناطیسی تمایل دارند که جهت گیری جدید خود را حفظ کنند. ازاینرو، رفتار مغناطیسی ماده مانند شرایط پیش از اعمال میدان نخواهد بود و با به صفر رسیدن میدان خارجی، ماده خاصیت مغناطیسی اندکی از خود بروز می دهد که به آن مغناطش یسماند (M) <sup>ا</sup> می گویند. با اعمال میدان مغناطیسی در جهت معکوس، خاصیت مغناطیسی القاشده به تدريج كاهش مي يابد و با رسيدن شدت ميدان به مقدار معين، خواص مغناطيسي ماده كاملاً از بين مي رود. به این مقدار از میدان مغناطیسی معکوس، که مغناطش پسماند را به صفر می ساند، نیروی ضدیسماند یا وادارندگی مغناطیسی (۲٫) می گویند. با افزایش میدان در جهت معکوس، ماده مجددا به اشباع مغناطیسی میرسد؛ با این تفاوت که جهت حوزههای مغناطیسی این بار عکس حالت قبلی است. کاهش شدت میدان و اعمال مجدد آن در جهت پیشین، حلقهٔ پسماند را کامل می کند.



مواد فرومغناطیس سخت، در مقایسه با مواد فرومغناطیس نرم، به میدان مغناطیسی قدرتمندتری برای مغناطش نیاز دارند؛ ازاینرو منحنی پسماند مغناطیسی مواد فرومغناطیس سخت سطح داخلی بیشتری دارد؛ همچنین، به طورمعمول، همهٔ حوزههای مغناطیسی مواد فرومغناطیس نرم در نقطهٔ اشباع مغناطیسی هم جهت میدان می شوند؛ بنابراین، میزان مغناطش فرومغناطیسهای نرم بیشتر از فرومغناطیسهای سخت است و مواد فرومغناطیس نرم، در مقایسه با مواد فرومغناطیس سخت، نقطهٔ بیشینه و کمینهٔ بالاتری در منحنی پسماند دارند. شکل۲۶ منحنی پسماند آهن خالص (فرومغناطیس نرم) و فولاد کربنی (فرومغناطیس سخت) را نشان می دهد.

- 1- Magnetic coercivity
- 2- Magnetization
- 3- Residual magnetization
- 4- Coercive force

گے۔۔ل) لو*وع* ن**واص موا** 



#### 🛧 خواص مغناطیسی مواد در مقیاس نانو

با کاهش ابعاد ماده و ورود به دنیای نانو، خواص مغناطیسی مواد هم مانند سایر خواص تغییر میکنند؛ برای مثال موادی مانند طلا و اکسید آلومینیوم، که در ابعاد تودهای خواص مغناطیسی ندارند، در ابعاد نانو خاصیت مغناطیسی از خود نشان میدهند. این امر موجب میشود که پژوهشگران با دستیابی به مواد مغناطیسی جدید و خواص مغناطیسی بهبودیافته برای مواد مرسوم مغناطیسی، فرصت مناسبی در زمینهٔ نانومواد مغناطیسی داشته باشند.

میتوان تأثیرات کاهش ابعاد مواد و ورود به مقیاس نانو بر روی خواص مغناطیسی را به دو اثر سطح و اندازه تقسیم کرد. اثر سطحی زمانی نمایان میشود که جمعیت اتمهای سطحی بسیار افزایش یابند. در چنین شرایطی، رفتار اتمهای سطحی بهتدریج نمایان میشود و بر رفتار کلی ماده حکمفرما می گردد. میدانیم که اتمهای سطحی پیوندهای ناقص فراوانی دارند. وجود چنین پیوندهای ناقص سطحی سبب ایجاد برخی تغییرات ساختاری، ازجمله تغییر عدد همسایگی در نزدیکی سطح و یا تغییر ثابت شبکه میشوند. درنتیجه، تقارن موجود در یک ساختار تودهای با افزایش جمعیت اتمهای سطحی در ابعاد نانو از بین میرود. یکی از تقارنهای مهم، وجود الکترونهای جفتشدهای است که با اسپین مخالف در یک اوربیتال پیوندی<sup>1</sup> حضور دارند. این الکترونها به سبب داشتن اسپین مخالف، تأثیرات مغناطیسی یکدیگر را خنثی می کنند؛ این درحالی است که ایجاد پیوندهای ناقص بر روی سطح موجب می گردد که این پیوندها شکسته شوند و الکترونهای جفتنشده بر روی سطح شکل بگیرد. ازاینرو، جمعیت الکترونهایی که برآیند مغناطیسی آنها صفر نیست افزایش مییابند و تعادل مغناطیسی، که در حالت تودهای وجود داشت، بهتدریج در ابعاد نانو از بین میرود. یک می بیود. می در الین روی سطح موجب می گردد که این پیوندها شکسته موند نو الکترونهای جفتنشده بر روی سطح شکل بگیرد. ازاینرو، جمعیت الکترونهایی که برآیند مغناطیسی آنها می نیست افزایش مییابند و تعادل مغناطیسی، که در حالت توده وجود داشت، بهتدریج در ابعاد نانو از بین می ود. می دهند؛ نانوذرت اکسید سریم (CeO\_) نمونهای از این مواد است.

تأثیر کاهش اندازه بر روی خواص مغناطیسی از چند جنبه قابل بررسی است. مهم ترین تأثیر کاهش اندازه بر خواص مغناطیسی مواد، نزدیک شدن اندازهٔ حوزه های مغناطیسی و اندازهٔ ذرات مغناطیسی به یکدیگر است. جهت گیری و اندازهٔ حوزه های مغناطیسی یکی از تعیین کننده ترین مشخصه های مواد مغناطیسی است. با کاهش اندازهٔ یک ذرهٔ فرومغناطیس به تدریج، ذره و حوزهٔ مغناطیسی هم اندازه می شوند و آن ذره به یک ذره تک حوزه تبدیل می شود. در روند کاهش اندازه، نانوذرات مغناطیسی رفتار جالبی از خود نشان می دهند (شکل ۲۷)؛ با کاهش اندازهٔ ذرات مغناطیسی بوامی مواد

۶.

ابتدا مقدار وادارندگی مغناطیسی زیاد میشود و این افزایش تا رسیدن به یک اندازهٔ بحرانی ادامه مییابد. پس از رسیدن به این اندازهٔ بحرانی، اندازهٔ ذره و حوزهٔ مغناطیسی برابر میشود و ذره به یک ذرهٔ مغناطیسی تکحوزه تبدیل می گردد. با کاهش اندازهٔ ذره، مقدار وادارندگی مغناطیسی کاهش مییابد و با کاهش هر چه بیشتر اندازهٔ ذره، نانوذره از مقدار بحرانی دیگری عبور میکند. پس از آن به دلیل برخی تأثیرات ابعاد نانو، در صورت حذف میدان مغناطیسی خارجی، دوقطبیهای موجود در نانوذره هم آزادانه جابهجا میشوند و جهت گیری میکنند؛ ازاینرو، مقدار پسماند و وادارندگی مغناطیسی نانوذره صفر میشود. این رفتار متفاوت نانوذرات فرومغناطیس به دلیل کاهش اندازه را خاصیت ابرپارامغناطیس<sup>۱</sup> مینامند. این مقدار بحرانی برای مواد مختلف متفاوت است. بهطورمعمول، پدیدهٔ ابرپارامغناطیس در اندازههایی کمتر از m



همان طور که در شکل (۲۷– آ) نشان داده شد، با کاهش اندازهٔ ذرات فرومغناطیس و نزدیک شدن اندازهٔ حوزههای مغناطیسی و ذره به یکدیگر، میزان وادارندگی روندی صعودی طی می کند؛ بااین حال، پیش از رسیدن به اندازهٔ بحرانی تک حوزه شدن، ذره به ناحیهای موسوم به ناحیهٔ شبه تک حوزه وارد می شود. در این ناحیه ذره، علی رغم اینکه چند حوزهٔ مغناطیسی دارد، رفتاری ترکیبی از خود نشان می دهد. در این شرایط، ذره همانند حالت تک حوزه، مقدار پسماند بالایی از خود نشان می دهد؛ در حالی که مانند ذرات چند حوزه برای بازگشت به حالت اولیهٔ خود به نیروی وادارندگی کمی نیاز دارد. در ادامه و با کاهش اندازه، ذره به قدری کوچک می شود که فقط می تواند درون خود پذیرای یک حوزهٔ مغناطیسی باشد. دوقطبی های مغناطیسی در ذرات تک حوزهٔ فرومغناطیس به طور یکنواخت همراستا هستند و به صورت ذاتی در مغناطش اشباع به سر می برند. در این شرایط، تا زمانی که اندازهٔ ذره به حد بحرانی تک حوزه شدن نزدیک باشد، تغییر جهت مغناطیسی ذره به انرژی زیادی نیاز خواهد داشت؛ به عبارت دیگر، ذرات تک حوزه، با اندازه ای نزدیک به اندازهٔ برحرانی تک حوزه شدن، نیروی وادارندگی بسیار بالایی دارند؛ زیرا در ذرات مغناطیسی چند حوزه، تغییر جهت مغناطیسی بعرانی تک حوزه شدن، نیروی وادارندگی بسیار بالایی دارند؛ زیرا در ذرات می می اندازه، تغییر جهت مغناطیسی بعرانی تک حوزه شدن، نیروی وادارندگی بسیار بالایی دارند؛ زیرا در ذرات مغناطیسی چند حوزه، تغییر جهت مغناطیسی



از طریق تغییرات تدریجی در مرز بین حوزههای مغناطیسی (مشابه مرز دانه در مواد چندبلوری) صورت می گیرد. این فرایند به دلیل کوچکی زیاد این ناحیه، در مقایسه با حوزهٔ مغناطیسی، به انرژی چندانی نیاز ندارد (شکل ۲۸)؛ درحالی که تغییر راستای میدان مغناطیسی در

گ<u>ح</u>ال لاوم خواص مواد

مفاهيم اوليه فناوري نانو و كاربردهاي آن در فيزيك

۶۲

بواص مواد

بحسال لال

ذرات تکحوزه نیازمند تغییر جهت تکتک دوقطبیهای مغناطیسی سازندهٔ ذره است که با صرف انرژی بسیاری همراه خواهد بود. بنابراین، تا زمانی که ذرات مغناطیسی تکحوزه اندازهای نزدیک به اندازهٔ بحرانی تکحوزهشدن دارند، دارای نیروی وادارندگی مغناطیسی بالایی نسبت به ذرات چندحوزهای مشابه خود خواهند بود.

مادامی که اندازهٔ ذرات مغناطیسی تک حوزه بیشتر از حد بحرانی ابرپارامغناطیس باشد، از نظر مغناطیسی ذرات پایداری محسوب میشوند. با کاهش اندازه تا حد بحرانی ابرپارامغناطیس، تغییر چشم گیری در مقدار نیروی وادارندگی نانوذرات مغناطیسی تک حوزه پیش می آید؛ به این ترتیب که با کاهش اندازه، نیروی وادارندگی ذرات مغناطیسی افت شدیدی پیدا می کند و با گذر از حد ابرپارامغناطیس به صفر می رسد. آنچه در این ناحیه موجب تسهیل تغییر جهت دوقطبیهای مغناطیسی می شود، تأثیرات ناشی از کاهش انرژی چسبندگی اتمهای تشکیل دهندهٔ ماده در ابعاد نانو است. یکی از نتایج این امر کاهش دمای ذوب نانوذرات نسبت به حالت توده ای آنهاست. در این شرایط، به دلیل کاهش نیروی چسبندگی اتمها، با کاهش اندازهٔ ذرات نیروی موردنیاز برای تغییر جهت دوقطبیهای مغناطیسی کاهش می یابد و ماده از فرومغناطیس سخت مجدداً به فرومغناطیس نرم تغییر رفتار می دهد.

با کاهش اندازهٔ ذره به کمتر از حد بحرانی ابرپارامغاطیس (معمولاً کمتر از mm ۲۰) انرژی چسبندگی میان اتمهای ماده کاهش می یابد؛ به گونه یک دوقطبی های مغناطیسی با جذب انرژی از محیط به راحتی از حالت هم راستا خارج می شود. بنابراین، با حذف میدان مغناطیسی خارجی و گذشت زمان معینی که به اندازهٔ نانوذرهٔ مغناطیسی و جنس آن بستگی دارد، دوقطبی های مغناطیسی جهت گیری تصادفی پیدا می کنند و ماده از نظر مغناطیسی خنثی می شود. گذار از حالت فرومغناطیس به ابرپارامغناطیس برای یک ذره، علاوه بر اندازه، به دما هم بستگی دارد. براین اساس، برای یک نانوذرهٔ مغناطیسی در حجم ثابت دمایی موسوم به دمای انسداد (T<sup>a</sup>)<sup>1</sup> تعریف می شود. نانوذره در دماهای پایین تر از دمای انسداد، رفتار فرومغناطیس و در دمای بالاتر از آن، رفتار ابرپارامغناطیس بروز می دهد. به بیان ساده، دمای انسداد دمای است که انرژی لازم برای برچیده شدن نظم موجود در جهت گیری دوقطبی های مغناطیسی را فراهم می کند. در دمای ثابت، برای یک مادهٔ مشخص حجم انسداد (T<sup>b</sup>)<sup>۲</sup> تعریف می شود. زاز این حجم خاصیت فرومغناطیس

## 🔘 افزایش استحکام مواد ریزدانه

در بخش نانومواد سهبعدی بیان شد که بسیاری از مواد بلورین از دانههای کوچکی تشکیل شدهاند که در محلی به نام مرزدانه به یکدیگر متصلاند. در بسیاری از موارد، دانههای تشکیلدهندهٔ مادهٔ بلور کامل و بدون نقص نیستند.

> یکی از نقصهای مهم در ساختار بلور، نابهجایی<sup>۳</sup> نام دارد. به بیان دیگر، نابهجایی عبارت است از قرارگیری تعدادی از اتمهای سازندهٔ یک بلور در راستای یک صفحه در محلی غیر ازآنچه نظم بلوری حکم میکند. شکل ۲۹ نوعی نابهجایی در شبکهٔ بلوری مکعبی ساده را نشان میدهد.



<sup>2-</sup> Blocking volume

3- Dislocation



الکترونی عبوری از یک نابه جایی در بلور منگنز سولفید (MnS) با ساختار بلوری مکعبی ساده [۲۴]

در حالت کلی، دو نوع تغییر شکل برای مواد جامد تحت تأثیر اعمال نیروی مکانیکی تعریف می شود: تغییر شکل کشسان<sup>۱</sup> یا برگشت پذیر و تغییر شکل مومسان<sup>۲</sup> یا برگشت ناپذیر. فنری فلزی را در نظر بگیرید؛ وقتی آن را به طور ملایم می کشیم، تغییر شکل فنر برگشت پذیر است و با رها کردن به شکل اولیه بازمی گردد؛ حال اگر فنر را با نیروی زیاد و بیش از حد بکشیم، فنر پس از رهاشدن دیگر به شکل اولیهٔ خود بازنمی گردد. دو مورد مذکور مثالی ساده از دو تغییر شکل مواد جامد است. اگر منحنی نیروی اعمال شده به فنر را به عنوان تابعی از تغییر شکل آن رسم کنیم، منحنی در ناحیه ای که تغییر شکل کشسان وجود دارد، خطی خواهد بود و زمانی که تغییر شکل مومسان رخ دهد، منحنی از حالت خطی خارج خواهد شد (شکل ۲۰). چنین منحنی هایی را منحنی تنش – کرنش<sup>۲</sup> می نامند. محور افقی این منحنی نشان دهندهٔ نسبت تغییر طول ( $\Delta$ L) به طول اولیه (L) است که کرنش (٤) نامیده می شود (رابطهٔ ۹۰) و محور عمودی بیانگر نیروی وارد شده (F) بر واحد سطح (A) است که تنش می شود (رابطهٔ ۹۰).





شکل ۳۰: منحنی تنش – کرنش برای یک جامد چندبلوری

بیشینهٔ تنشی را که یک ماده میتواند بدون تغییر شکل مومسان تحمل کند، دراصطلاح تنش تسلیم (T)<sup>۲</sup> مینامند. برایناساس، با اعمال تنشی بیش از تنش تسلیم به یک ماده، آن ماده دچار تغییر شکل بازگشتناپذیر میشود. هرچقدر تنش تسلیم یک ماده بیشتر باشد، مقاومت آن در برابر تغییر شکل برگشتناپذیر بیشتر خواهد بود و دراصطلاح، استحکام یا سختی بیشتری خواهد داشت. عامل ایجاد تغییر شکل مومسان در مواد چندبلوری حرکت نابهجاییهاست. نابهجاییها میتوانند درون ساختار بلور حرکت کنند و جابهجا شوند و از این طریق استحکام یک بلور را کاهش دهند و امکان تغییر شکل مومسان آن را فراهم کنند. اندازهٔ دانهها و حجم مرزدانهها یکی از مهمترین عواملی است که خواص مکانیکی مادهٔ جندبلوری موجب میگردد که استحکام آن ماده در برابر تغییر شکل مومسان افزایش یابد. کاهش اندازهٔ دانهها در ماده مادهٔ چندبلوری موجب میگردد که استحکام آن ماده در برابر تغییر شکل مومسان افزایش یابد. کاهش اندازهٔ دانهها در ماده مادهٔ چندبلوری سبب افزایش چشمگیر مرزدانهها در ماده میشود و درنتیجه، استحکام آن را افزایش میدهد.

- 2- Plastic deformation
- 3- Stress-strain curve

4- Yield stress

ٹھنےل) لو*وع* **خواص موا** 

<sup>1-</sup> Elastic deformation

استحکام یا سختی یک مادهٔ چندبلوری ارتباط مستقیمی با معکوس ریشهٔ دوم اندازهٔ دانههای سازندهٔ آن دارد (d<sup>-1/2</sup>). رابطهای که نشاندهندهٔ ارتباط میان اندازهٔ دانه و تنش تسلیم یک ماده است را رابطهٔ هال – پچ<sup>(</sup> (رابطهٔ ۱۱) مینامند.

$$\tau = \tau_0 + k d^{-1/2} \tag{(11)}$$

در رابطهٔ فوق <sub>0</sub> و k دو ثابتاند که برای مواد مختلف باید تعیین گردند. رابطهٔ هال – پچ پیش بینی می کند که استحکام مواد چندبلوری با کاهش اندازهٔ دانهها افزایش می یابد. این افزایش با ریشهٔ دوم اندازهٔ دانه در ارتباط است. آنچه رابطهٔ هال – پچ (رابطهٔ ۱۱) برای استحکام مواد جامد چندبلوری، از جمله انواع فلزات، پیش بینی می کند، برای موادی با دانههای میکرومتری کاملاً برقرار است. با کاهش اندازهٔ دانهها و ورود آنها به ابعاد نانو استحکام ماده افزایش می یابد ولی مشاهدات نشان داده است که این افزایش دائمی نیست و تا اندازهٔ خاصی، که موسوم به اندازهٔ بحرانی (م) است، ادامه می یابد. وقتی اندازهٔ دانههای مادهٔ جامد برابر اندازهٔ بحرانی می شود، این ماده بیشترین تنش تسلیم را از خود نشان می دهد و دراصطلاح، دارای ابراستحکام<sup>۲</sup> می شود. پس از این نقطه و با کاهش هرچه بیشتر اندازهٔ دانهها، استحکام ماده کاهش می یابد و دراصطلاح، ماده رفتار فوق شکل پذیری<sup>۳</sup> از خود نشان می دهد (شکل ۳۱).



اندازهٔ بحرانی که پس از آن مادهٔ جامد چندبلوری استحکام خود را از دست میدهد، حدود m ۲۰ – ۲۰ تعیین شده است. افزایش استحکام ماده با کاهش اندازهٔ دانهها به استحکام بخشی مرزدانهای<sup><sup>4</sup></sup> معروف است. با کاهش بیش ازحد دانهها، در عمل کل ماده به مرزدانه تبدیل می شود. در این هنگام لغزش و حرکت دانهها در میان مرزدانهها به راحتی و با اعمال تنشی اندک میسر می شود؛ از این رو، در موادی با دانههای کوچکتر از اندازهٔ بحرانی رفتار فوق شکل پذیری<sup>6</sup> مشاهده می شود. این مواد نرماند و با اعمال اندکی نیرو تغییر شکل می دهند.

- 4- Grain boundary strengthening
- 5- Super ductility

کتبال لاوم واص موا

<sup>1-</sup> Hall - Petch

<sup>2-</sup> Super strength

<sup>3-</sup> Super deformability



کاربردهای

فناوری نانو

نویسند گان همکار در این فصل: فائزه ابراهیمیان غازانی یوسف شلاگه

ا مقدمه:

مشاهدهٔ پدیدههای مختلفی که در مقیاس نانو رخ دادهاند و نیز دستیابی به دانش کافی دربارهٔ چیستی و چرایی این پدیدهها ما را قادر میسازد که برای ساخت و توسعهٔ محصولات جدید از خواص و ویژگیهای جدید پدیدار در ابعاد نانو استفاده کنیم. این محصولات نوین میتوانند راهگشای بسیاری از مشکلات پیشین باشند و رفاه و آسایش بیشتری برایمان فراهم کنند. در ادامه، چند مورد از کاربردهای فناوری نانو، که مبنای فیزیکی دارند و در سطح مقدماتی قابل بیاناند، معرفی میشوند.

# 🚸 \_ فناوری نانو و افزایش سرعت پردازش اطلاعات

فناوری الکترونیک<sup>۱</sup> با ایجاد محصولات متنوع دنیای جدیدی را پیش روی انسان گشوده است. همچنین، پردازش و ذخیرهسازی اطلاعات با استفاده از پیغامهای الکتریکی انقلاب بزرگی در زندگی بشر ایجاد کرده است. از همان آغاز، علاقهٔ بسیاری برای طراحی و ساخت انواع تجهیزات الکترونیکی جدید، کارآمد و سریع به وجود آمد. این امر موجب شد تا روند کوچکسازی انواع تجهیزات الکترونیکی بهعنوان هدفی کلی در صنایع الکترونیکی مطرح گردد. جرقههای اولیهٔ چنین رویکردی حدود سال ۱۹۶۵ و پیش از آغاز مباحث اصلی فناوری نانو زده شد؛ زمانی که تلاشهای بسیاری برای کوچکتر کردن ترانزیستورها<sup>۲</sup> آغاز گردید.

کوچکترشدن ابعاد ادوات الکترونیکی<sup><sup>7</sup> علاوه بر افزایش سرعت پردازش، توان مصرفی را هم کاهش میدهد؛ ازاینرو، کوچککردن هر چه بیشتر ادوات الکترونیکی، بهویژه ترانزیستورها، برای دستیابی به محصولات کارآمد و مفیدتر اهمیت بسیاری دارد. امروزه، فناوری تولید ادوات الکترونیک با معماری در ابعاد نانو را نانوالکترونیک<sup>†</sup> مینامند. نانوالکترونیک به استفاده از فناوری نانو در صنعت الکترونیک اشاره دارد گسترهٔ وسیعی از ادوات و مواد الکترونیکی را شامل میشود. این ادوات همگی در یک ویژگی مشترکاند؛ اندازهٔ کوچک در مقیاس نانو.</sup>

## 💿 ترانزیستورچیست؟

برای درک بهتر مباحث الکترونیک نیاز است با ترانزیستور، که مهمترین جزء مدارهای الکترونیکی است، آشنا شوید. امروزه مدار مرکزی تمام وسایل الکترونیکی، حتی سادهترین اسباب بازیهای سخن گو، از کنار هم قرار دادن چند میلیون ترانزیستور به وجود میآیند؛ برای مثال فقط در ساخت گوشیهای تلفن همراه هوشمند، بیشتر از ۱ میلیارد ترانزیستور استفاده شده است. ترانزیستورها آجربنای تمام دستگاههای الکترونیکی هستند و بدون وجود آنها امکان ساخت هیچیک از تجهیزات الکترونیکی، که بهطور روزمره با آن سر و کار داریم، مقدور نبود و دنیای دیجیتال<sup>6</sup> وجود نداشت. به بیان ساده، ترانزیستور قطعهای نیمهرساناست که بهعنوان کلیدی الکترونیکی وظیفهٔ قطع و وصل پیغامهای الکترونیکی و نیز، تقویت آنها در مدار الکترونیکی را بر عهده دارد.

ترانزیستورها دو نوع کلی دارند: ترانزیستورهای اتصال دوقطبی (BJT) و ترانزیستورهای اثر میدانی (FET) . اساس کار این دو ترانزیستور بسیار شبیه به یکدیگر است. در این بخش، ترانزیستورهای اثرمیدانی اکسید فلزی

- 2- Transistor
- 3- Electronic devices
- 4- Nanoelectronics
- 5- Digital
- 6- Bipolar junction transistor
- 7- Field effect transistor

یاربردهای فناوری نانو

Serly mild

<sup>1-</sup> Electronics

نیمه، سانا (MOSFET) <sup>۱</sup>، که گروه پر کاربردی از ترانزیستورهای اثرمیدانیاند، بررسی میشوند. عملکرد ترانزیستور مانند عملکرد یک کلید کنترلشونده است. میتوان با اعمال ولتاژی خاص به ترانزیستور، مشخص کرد که ترانزیستور در حالت وصل باشد یا در حالت قطع. بهطور معمول، هر ترانزیستور سه پایه دارد؛ یکی از این پایهها، که گیت امیده می شود، کنترل کنندهٔ جریان بین دو پایهٔ دیگر است. در صورتی که پایهٔ گیت اجازهٔ اتصال بدهد، دو پایهٔ دیگر با نامهای درین و سورس به هم وصل میشوند و جریان الکتریکی از درین به سورس برقرار میگردد. به بیان ساده، گیت در ترانزیستورها نقش دکمهٔ کلید را دارد و با اعمال ولتاژ به آن، جریان قطع یا وصل می شود. حالت اتصال، بسته به نوع ترانزیستور، می تواند با اعمال ولتاژ مثبت یا منفی به پایهٔ گیت رخ دهد؛ براین اساس، ترانزیستورهای MOSFET به دو نوع مثبت (p-MOSFET) و نوع منفی (n-MOSFET) تقسیم می شوند (شکل ۱). در ترانزیستورهای نوع مثبت، جریان بین پایههای سورس و درین با به جریان درآمدن حاملهای بار مثبت برقرار می شود؛ ازاین رو، آنها را نوع مثبت مینامند. در این نوع ترانزیستورها، فعالکردن کانال گیت با اعمال ولتاژ منفی صورت میگیرد. در ترانزیستورهای نوع منفی نیز برقراری اتصال در اثر به جریاندرآمدن حاملهای بار منفی صورت می گیرد؛ بنابراین، آنها را نوع منفی مینامند. جریان در ترانزیستورهای نوع منفی در اثر اعمال ولتاژ مثبت به کانال گیت برقرار میشود. نکتهٔ جالب دربارهٔ عملکرد ترانزیستورها این است که ولتاژ اعمالی به پایهٔ گیت می تواند جریان برقرارشده بین دو پایهٔ سورس و درين را تقويت كند؛ ازاينرو، ترانريستورها علاوه بر نقش كليد قطع و وصل جريان، تقويتكننده ٌ جريان هم هستند. ترانزیستورها در مدارهای الکترونیکی در نقش حافظه نیز ظاهر میشوند. این قابلیتها باعث شده است که ترانزیستورها جزء جدایی نایذیر و اصلی در تمام ادوات و تجهیزات الکترونیکی باشند.

ترانزیستورها در مدارهای الکترونیکی، بسته به برقراری یا عدمبرقراری اتصال بین دو پایهٔ سورس و درین، درنهایت خروجیهای روشن و خاموش را، که به صفر و یک تعبیر میشوند، ارائه میکنند. این امر باعث شده است که تمام پردازشهای رایانهای مبتنی بر صفر و یک باشد. به این نوع عملکرد پردازشی، پردازش دیجیتال<sup>6</sup> میگویند.



سخل : نصوه مسان دادن دو نوع نزار بیستور (۲) P=۱۹۲۵۲۲۲۱ و (ب) Careare در مدار الخبریدی (حرف G نشان دهندهٔ پایهٔ گیت، حرف D نشان دهندهٔ پایهٔ درین و حرف S نشان دهندهٔ پایهٔ سورس است)

موادی که در تولید ترانزیستورها استفاده میشوند نیمهرسانا هستند. ترانزیستورها این ویژگی را دارند که در شرایط خاص، جریان از درین به سورس برقرار میشود و در شرایط دیگر این جریان وجود ندارد. چنین خاصیتی نشان میدهد که نمی توان از مواد رسانا، که همیشه جریان را از خود عبور میدهند، استفاده کرد. به کارگیری مواد نارسانا نیز به دلیل مشابه ممکن نیست. خاصیت کنترل پذیری رسانایی الکتریکی در مواد نیمهرسانا وجود ترانزیستورها را امکان پذیر ساخته است.

- 2- Gate
- 3- Drain
- 4- Source
- 5- Amplifier
- 6- Digital processing

مفاهيم اوليه فناوري نانو و كاربردهاي آن در فيزيك

کاربردهای فناوری نان

فحسران فليجرو

<sup>1-</sup> Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

اولین ترانزیستور در زمستان ۱۹۴۷ میلادی در آزمایشگاه بِل<sup>۱</sup> ساخته شد. در ساخت این نمونهٔ اولیه از عنصر ژرمانیوم (Ge) استفاده شد (شکل ۲- آ). در ۱۹۵۸ میلادی، جک کیلبی<sup>۲</sup> اولین مدار مجتمع (IC)<sup>۳</sup> الکترونیکی را ساخت (شکل ۲- ب). کیبلی در سال ۲۰۰۰ میلادی، به دلیل اختراع مدارهای مجتمع برندهٔ جایزهٔ نوبل فیزیک شد. مدار مجتمع کیبلی هم از ژرمانیوم ساخته شده بود. شش ماه بعد از کیبلی، روبرت نویس<sup>1</sup> مدار مجتمع کارآمدتری بر پایهٔ سیلیکون (Si) ساخت. مدار مجتمع در واقع، یک مدار الکتریکی کوچکسازی شده است که تعداد زیادی ترانزیستور و البته، قطعهٔ الکترونیکی دیگر را شامل میشود و معمولاً، برای انجام کارهای خاص طراحی و ساخته شده است. شکل ۳ تصویری از یک مدار مجتمع معمولی را نشان میدهد.

مقایسهٔ ابعاد اولین ترانزیستور ساختهشده (شکل ۲- آ) با آنچه در مدارهای مجتمع امروزی (شکل ۳- ب) استفاده می شود، بیانگر تحولی اساسی در فرایند ساخت تجهیزات و ادوات الکترونیک است. پنه فرایندهای ساخت امروزی مدارهای مجتمع امکان تجمیع تعداد زیادی ترانزیستور در حجم بسیار کوچک را فراهم می آورند که نتیجهٔ آن تجهیزات الکترونیک بسیار کوچک، سبک و درعین حال، کار آمدتر است.



شکل ۲: (آ) نمونهٔ بازسازیشدهٔ اولین ترانزیستور ساختهشده در سال ۱۹۴۷ [۲۵] و (ب) نمونهٔ بازسازیشدهٔ اولین مدار مجتمع ساختهشده (۲۶]



💿 کوچککشدن ترانزیستورها و قانون مور

گوردون مور<sup>6</sup>، از بنیان گذاران شرکت اینتل<sup>6</sup>، در سال ۱۹۶۵ میلادی، با مشاهدهٔ اینکه تقریباً هر دو سال یکبار پیچیدگی مدارهای الکترونیکی دو برابر میشود، قاعدهای سرانگشتی برای محاسبهٔ سرعت افزایش پیچیدگی مدارهای الکترونیکی

- 1- Bell Labs
- 2- Jack Kilby
- 3- Integrated circuit
- 4- Robert Noyce
- 5- Gordon Moore
- 6- Intel

بیان کرد؛ تعداد ترانزیستورهای روی یک تراشه <sup>۱</sup> با مساحت ثابت، به طور تقریبی هر دو سال دو برابر می شود. پیش بینی مور بسیار دقیق بود و امروزه، با نام قانون مور<sup>۲</sup> شناخته می شود. این روند به معنای کاهش اندازهٔ حدود ۳۰٪ ترانزیستورها در مدت دو سال است (شکل ۴). برای مثال، تعداد ترانزیستورهای موجود در تراشهٔ ۴۰۰۴ اینتل، که در سال ۱۹۷۱ به بازار عرضه شد، برابر ۲۳۰۰ بود؛ این در حالی است که امروزه در پردازنده های چهار هسته ای Core i7 (شکل ۵)، که در رایانه های شخصی استفاده می شود، بیش از یک میلیارد ترانزیستور تعبیه شده است.



شکل ۴: روند افزایش تعداد ترانزیستورها در یک تراشه و قانون مور (رنگ قهوهای) و روند کاهش اندازهٔ اجزای ترانزیستورها [۲۷]



شکل ۵ : تراشهٔ نسل هشتم اینتل (۶۷۰۰k – ۷ core) که با فناوری ۱۴ ۳m تولید شده است و در آن ٪ ۱٬۷۰٬۰۰۰٬۰۰ عدد ترانزیستور تعبیه شده است

اگر بادقت به اطراف خود توجه کنید، خواهید دید که رایانهها بخش بزرگی از امور زندگی مدرن بشر را کنترل میکند؛ به نحوی که همهٔ تجهیزات موجود در اطراف ما، حتی وسایل آشپزخانه، پردازنده و رایانهٔ خاص خود را دارند. این روند مدیون فناوریهایی است که ساخت ترانزیستور در ابعاد نانومتری را ممکن کرده است و به ساخت پردازندههای سریع منتهی شده است.

سؤالی که ممکن است ذهن شما را درگیر کند این است که چرا شرکتهای سازندهٔ مدارهای مجتمع علاقه دارند که اندازهٔ ترانزیستورها را کوچک کنند و تعداد بیشتری ترانزیستور در مدارهای مجتمع قرار دهند؟ شاید نخستین دلیل تمایل سازندگان به کاهش حجم و وزن محصولات و راحتی استفاده از آنها باشد ولی دلیل اصلی افزایش سرعت

1- Chipset

2- Moore law

پردازندهها میک مدار پردازش بیشتر باشند، قدرت پردازشهای دیجیتال بر عهده دارند؛ براین اساس، هر قدر که تعداد ترانزیستورهای یک مدار پردازش بیشتر باشند، قدرت پردازش آن مدار افزایش مییابد. کوچک ترشدن مسیر پیمایش حاملهای الکتریکی (الکترونها و حفرهها)، که حامل پیغامهای پردازشیاند، به معنای افزایش سرعت انجام آن عملیات خاص است. همچنین، با کاهش اندازهٔ ترانزیستورها، میتوان اطلاعات بیشتری را در حجم کوچک تر نگه داشت. دلیل مهم دیگری، کاهش انرژی و توان مصرفی ترانزیستور است که با کوچک ترشدن ترانزیستورها تحقق مییابد. با کاهش اندازهٔ ترانزیستورها مواد مصرفی برای ساخت همان تعداد ترانزیستور کاهش مییابد و در صورت بهینه بودن هزینهٔ تولید، درنهایت سبب کاهش هزینهٔ کل به ازای تعداد مشخصی ترانزیستور میشود. با گذشت زمان و کشف روشها و فنون جدید ساخت ترانزیستورها و مدارهای مجتمع، اندازهٔ ترانزیستورها روزبه روز کوچک تر شده است، اما این

回 محدودیتهای قانون مور

معمولاً، ابعاد ترانزیستور را با طول کانال ترانزیستور<sup><sup>7</sup></sup>، یعنی فاصلهٔ بین سورس و درین، مشخص میکنند. نمودار آبی در شکل ۴ روند کوچکشدن اندازهٔ کانال ترانزیستورها را نشان میدهد. درحال حاضر (سال ۲۰۱۹)، شرکتهای اصلی تولیدکنندهٔ پردازندهها، مانند اینتل و سامسونگ، پردازندههایی با فناوری ۱۰ mm در عولید میکنند. مادهٔ اصلی مورد استفاده برای ساخت این ترانزیستورها سیلیکون است که اندازهٔ اتمی آن حدود mm میایکون در هر با در نظر گرفتن فاصلهٔ مربوط به پیوند اتمی، به صورت تقریبی، میتوان گفت که فقط چند ده اتم سیلیکون در هر ترانزیستور با این ابعاد وجود دارد. بخشی از محدودیتهای ورود به ابعاد کوچک، به یژه ابعاد کمتر از چند ده نانومتر، به رفتارهای پیش بینی شده و پیش بینی نشدهٔ اتمها در چنین ابعاد کوچکی ناشی می شود. در این محدوده، پدیده هایی رخ می دهد که در ابعاد بزرگ به راحتی میتوان از آنها صرفنظر کرد، اما در ابعاد چند اتم قابل چشم پوشی نیستند. این مشکلات به چالش های کوانتومی موسوماند.

مشکل دیگری که وجود دارد، فناوری ساخت ترانزیستور در این ابعاد است؛ با کوچکترشدن ترانزیستورها باید دقت ساخت هم به همان نسبت بیشتر شود. رفتار موجی نور در ابعاد کوچک محدودیتهایی را در ساخت مدارهای مجتمع به روش لیتوگرافی نوری<sup>7,\*</sup> ایجاد میکند. ابداع روشهایی با دقت بیشتر از چند نانومتر، که برای تولید صنعتی صرفهٔ اقتصادی داشته باشد، نیازمند تغییرات اساسی و نوآوریهای فراوان است. این چالش با کوچکترشدن اندازهٔ ترانزیستورها سخت ر می شود.

علاوه بر چالشهای کوانتومی و فناوری ساخت، مشکل دیگری که ترانزیستورهای با ابعاد بسیار کوچک با آن روبهرو هستند افزایش چگالی جریان الکتریکی در ترانزیستورهای بسیار کوچک است که سبب افزایش دمای آنها تا چند صد درجهٔ سانتیگراد میشود. میدانیم که در ابعاد نانو، دمای ذوب مواد کمتر از حالت تودهای آنهاست. چنین دمایی بهراحتی میتواند در عرض چند ثانیه ترانزیستور را ذوب کند و مدار را از بین ببرد. بنابراین، کاهش اندازهٔ ترانزیستورها با دو چالش بزرگ دیگر روبهرو است؛ مواد اولیهٔ مناسب و مقاوم در برابر دمای بالا و فناوری خنکسازی. وجود چنین مشکلاتی در فرایندهای کوچکسازی ترانزیستورها موجب میگردد که کوچکسازی ترانزیستورها با الگوهای موجود در سالهای آتی با سرعت بسیار کمی پیش برود و احتمالاً، این روند برای معماری فعلی پردازندهها متوقف شود. کاربردهای فناوری نانو

serly mild

<sup>2-</sup> Transistor channel

<sup>3-</sup> photolithography

🔘 چالش های ساخت ترانزیستورها در ابعاد نانومتری

کوچککردن ابعاد ترانزیستورها و ورود به محدودهٔ نانومتری مزایای زیادی برای افزایش کارایی و سرعت آنها دارد و سبب کاهش هزینه و مصرف انرژی میشود. بااینحال، ورود به دنیای نانومتری، یعنی جایی که رفتار تکتک اتمها و پدیدههای کوانتومی اهمیت پیدا میکند، چالشهای بسیاری پیشروی فرایندهای ساخت مدارهای مجتمع ایجاد کرده است. در ادامه برخی از این چالشها بررسی خواهند شد.

نقص بلوری<sup>1</sup> یکی از چالشهایی است که بر سر راه کوچکسازی ترانزیستورها قرار دارد. نقص بلوری به بینظمیهای جزئی اتمها یا یونها در شبکهٔ بلوری ماده گفته میشود. این بینظمیها زمانی رخ میدهند که اتمها یا یونها در جایی غیر از محل مقرر خود در شبکه بلوری باشند. نقص بلوری معمولاً، به صورت جای خالی<sup>۲</sup> اتم یا یون دیده میشود. انواع دیگر نقص بلوری بهصورت بیننشینی<sup>۳</sup> یا جانشینی<sup>۴</sup> است، که در مقایسه با نقص بلوری جای خالی، کمتر مشاهده میشوند. در این نوع نقصها بلوری، اتمی غریبه وارد ساختار بلور میشود و ایجاد نقص میکند (شکل ۴).



با توجه به اینکه تعداد اتمهای ترانزیستور در ابعاد نانومتری کم و قابل شمارش است، نقص بلوری به مشکلی جدی تبدیل میشود؛ زیرا رفتار الکتریکی ترانزیستور به تک تک اتمهای سازنده وابسته است و در صورت وجود نقص بلوری در ساختار سیلیکون، به تغییر رفتار شدید ترانزیستور منجر میشود. برای مثال، وجود چنین نقصهایی موجب انحراف الکترونها از مسیر اصلی حرکتشان و اتلاف جریان میشوند. نتیجهٔ این پدیده، مصرف بالای انرژی و افزایش دمای کار پردازنده است. شکل ۷ تصویری از سطح بلور سیلیکون را نشان میدهد که تعداد زیادی نقص بلوری جای خالی دارد.



شکل ۷: نقص های بلوری جای خالی بر روی سطح بلور سیلیکون [۲۸]

همانطور که در فصل دوم دربارهٔ نظریهٔ نواری توضیح داده شد، ساختار انرژی مواد در ابعاد کوچک به تکتک اتمها وابسته است؛ در نتیجه، اگر در یک نانوساختار، اتمی کم یا زیاد شود یا با اتمی دیگر جایگزین شود، ساختار انرژی جسم تغییر قابلتوجهی میکند؛ به این معنی که تراز انرژی جدیدی به آن اضافه یا از آن کم میشود یا اندازهٔ شکاف

- 2- Vacancy
- 3- Interstitial defect
- 4- Substitutional defect

<sup>1-</sup> Crystalline defect

انرژی میان ترازها تغییر میکند. در حالتی که تراز انرژی جدید بهطور ناخواسته به ساختار افزوده شده است، با اعمال ولتاژی کمتر از ولتاژ مشخص برای نیمهرسانای بلوری بدون نقص ممکن است برخی الکترونها به نوار رسانش بروند و جریان الکتریکی تولید کنند. در این صورت، گفته میشود که نشتیِ جریان رخ داده است. این امر موجب اتلاف انرژی و کارکرد نادرست ترانزیستور میشود. در حالتی که اندازهٔ شکاف انرژی میان ترازها افزایش یافته است، قطعهٔ الکترونیکی با اعمال ولتاژ متعارف، که در حین طراحی مدنظر قرار گرفته است، فعال نمیشود و نمیتوان از آن استفاده کرد.

با کوچککردن ترانزیستورها، چگالی بار عبوری از اجزای آنها افزایش پیدا میکند. این پدیده دو پیامد منفی در پی دارد. نخستین پیامد با نام تخلیهٔ بار الکتریکی شناخته میشود و زمانی رخ میدهد که دو چگالی بار بزرگ در نزدیکی هم قرار بگیرند و بین آنها مادهای عایق وجود داشته باشد. اگر نسبت اندازهٔ بار به فاصله دو بار از یک دیگر بیشتر از مقدار معینی شود، مادهٔ عایق یونیزه می شود و بار از آن عبور میکند و به اصطلاح، مادهٔ عایق دچار شکست الکتریکی <sup>۲</sup> می شود. این پدیده در ترانزیستورها سبب تخریب دائمی ساختار و تغییر رفتار الکتریکی آنها می شود.

دومین پیامد افزایش چگالی بار به پدیدهٔ تونلزنی کوانتومی<sup>۳</sup> معروف است. در فیزیک کلاسیک، فرض بر این است که اگر الکترونی انرژی کافی برای گذر از سطح انرژی اتم و رهایی از آن را نداشته باشد، نمیتواند از جاذبهٔ اتم آزاد شود؛ اما فیزیک کوانتومی احتمال بسیار کمی برای این اتفاق قائل است. این تفاوت نظر به سبب مشاهداتی است که در ابعاد کوچک دارای اهمیتاند. رفتار موجی ذرهای الکترون و انتقال انرژی از عناصر مجاور به الکترون میتواند باعث شود الکترون با انرژی ناکافی از سد انرژی بگذرد.

تونلزنی کوانتومی به معنای جداشدن الکترون با سطح انرژی نسبتاً کم از اتم خود و انتقال یافتن آن به اتم دیگر است. تونلزنی کوانتومی در ترانزیستورها فایدهای ندارد و فقط موجب نوعی نشتی بسیار کم جریان میشود. احتمال وقوع این پدیده و همچنین، تأثیرات منفی آن در ترانزیستورها با کاهش ابعاد ترانزیستور افزایش مییابد. میتوان این پدیده را مهمترین عامل محدودکننده برای کاهش ابعاد ترانزیستورها دانست. تونلزنی الکترونی مانند تخلیهٔ الکتریکی موجب تخریب ساختار ترانزیستور نمیشود ولی با ایجاد اخلال در عملکرد صحیح آن، ترانزیستور را ناکارآمد میکند.

## 🖲 نانوترانزیستورها

از ۵۰ سال پیش، سیلیکون مادهٔ اصلی سازندهٔ ترانزیستورها محسوب می شود. همان طور که در قسمت قبل بیان کردیم، ترانزیستورهای بر پایهٔ سیلیکون محدودیت هایی دارند که اجازه نمی دهند اندازهٔ ترانزیستورها از حد خاصی کوچک تر شود. پژوهشگران برای حل این مشکل دو رویکرد در پیش گرفتند؛ رویکرد نخست با ثابت نگه داشتن مواد مورد استفاده و پیشنهاد ساختار جدید می کوشد مشکلات ذکر شده را بر طرف کند؛ اما اساس رویکرد دوم یافتن روش های جدید بر پایهٔ مواد جدید است.

در رویکرد دوم، پژوهشگران بهدنبال یافتن مولکولهای منفردیاند که ویژگیهای موردنظرشان را تأمین کند. با کشف نانولولههای کربنی<sup>1</sup> در ۱۹۹۱ میلادی و پیبردن به خواص شگفتانگیز الکترونیکی، مکانیکی، نوری و شیمیایی آنها، برخی از پژوهشگران ایدهٔ استفاده از نانولولههای کربنی به جای ترانزیستورهای سیلیکونی را مطرح کردند. نانولولههای کربنی، بسته به محور چرخش خود، می توانند رسانا یا نیمهرسانا باشند.<sup>\*\*</sup> با توجه به کارکرد ترانزیستور، فقط

۳- در فصل چهارم و در قسمت میکروسکوپ روبشی تونلی در مورد پدیده تونلزنی کوانتومی (quantum tunneling) صحبت خواهد شد.

کاربردهای فناوری نانو

serly mild

<sup>1-</sup> Electrical discharge

<sup>2-</sup> Electrical breakdown

<sup>4-</sup> Carbon nanotube
از نانولولههای کربنی نیمهرسانا میتوان بهعنوان جایگزینی برای ترانزیستورها استفاده کرد. نانولولههای کربنی رسانا همواره جریان را از خود عبور میدهند و نمیتوانند خاصیت ترانزیستور را (که مانند کلید عمل میکند) داشته باشند. در ترانزیستورهای کنونی، یک لایهٔ سیلیکونی اتصال بین درین و سورس را برقرار میکند؛ در صورتی که، در ترانزیستورهای اثر میدانی با نانولولههای کربنی، از نانولولههای کربنی نیمهرسانا بهعنوان اتصال بین درین و سورس استفاده می مود. تلاشهای بسیاری برای طراحی، ساخت و تجاریسازی ترانزیستورهای مبتنی بر نانولولههای کربنی در حال انجام است.



شکل ۸ (آ): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از یک ترانزیستور اثر میدانی نانولوله کربنی [۲۹] و (ب) طرحی از یک ترانزیستور اثر میدانی نانولوله کربنی

استفاده از نانولولههای کربنی محدودیتهای ذکرشده برای ادوات سیلیکونی را برطرف میکند. رسانایی الکتریکی و حرارتی بالا و مقاومت الکتریکی کم نانولولههای کربنی مانع میشود که با گذشتن چگالی جریان بالا از آنها گرمای زیادی تولید شود؛ درحالیکه، دمای ترانزیستورهای سیلیکونی با کوچکترشدن و بیشترشدن چگالی جریان آنها بهطور غیرعادی، افزایش مییابد. تولید نانولولههای کربنی به لیتوگرافی نوری نیاز ندارد و باعث ایجاد محدودیتهای فناوری از این جنس نمیشود.

ایدهٔ استفاده از نانولولهها به جای سیلیکون مزایای بسیاری دارد ولی هنوز در مراحل ابتدایی به سر میبرد و فاصلهٔ زیادی تا عملیشدن دارد. دانشمندان توانستهاند با استفاده از نانولولهها تک ترانزیستورهایی بسازند، اما فناوری کنونی هنوز هم برای ساخت تعداد انبوه این نانوترانزیستورها روی یک تراشه با چالشهای بسیاری روبهرو است. یکی از چالشهای دانشمندان ایجاد ساختار مشابه مولکولی در حجم بسیار زیاد است. خواص نانولولههای کربنی بسیار به ساختار مولکولی آنها وابسته است و تغییری اندک در ساختار مولکولی نانولوله میتواند تأثیر زیادی در خواص مختلف آن ایجاد کند. در روشهای ارزان تولید نانولولهها، امکان نظارت و کنترل کامل در طول فرایند تولید وجود ندارد؛ ازاینرو رسیدن به فناوری ساخت تعداد زیاد نانولولهها با ساختار و خواص مشابه و قیمت مناسب مسأله مهمی است که تلاشهای بسیاری دربارهٔ آن در حال انجام است. از چالشهای دیگر این مسیر، حذف ناخالصیهای ایجادشده هنگام تولید نانولولههاست. برقراری اتصالات میانی هم میتواند از یکی مشکلات چالش برانگیز باشد. نانوترانزیستورهای سیلیکونی تعولی علیه ولید م کنونی، مزایای بسیاری دارند و پیش بینی می شود که استفاده از آنها به جای ترانزیستورهای سیلیکونی تولی علیم و می می به با ترانزیستورهای منعت الکترونیک ایجاد کند؛ اما تا رسیدن به فناوری ارزان و بهینهٔ تولید آنها ماه می سیلیکونی تحولی عظیم در صنعت الکترونیک ایجاد کند؛ اما تا رسیدن به فناوری ارزان و بهینهٔ تولید آنها ماسافت بسیاری وجود دارد.

# 🚸 فناوری نانو و ذخیرهسازی اطلاعات

علاوه بر پردازش اطلاعات، ذخیرهسازی و بازخوانی اطلاعات هم ارکان اساسی دیگر زندگی انسان در عصر حاضر محسوب میشوند. در دنیای دیجیتال امروزی، روزانه حجم بسیار زیادی از اطلاعات تولید، ذخیره و بازخوانی میشوند؛

گتــل سرم کاربردهای فناوری نان

مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك

اطلاعاتي كه پيشازاين، به هيچوجه امكان توليد و ذخيرهسازي آنها وجود نداشت. همهٔ عكسهايي كه با دوربين دیجیتال گوشیهای تلفن همراه خود می گیرید، فیلمهای ذخیرهشده روی گوشی تلفن همراه که آن را یخش می کنید و متنهایی که بهعنوان پیغام برای مخاطبان خود ارسال میکنید، مثالهایی ساده از دادههاییاند که در تولید و ذخیرهسازی آنها نقش مستقیم دارید. بدون بهره گیری از فناوری نانو در فرایندهای طراحی و ساخت ادوات الکترونیکی، نمی توانستیم چنین حجمی از اطلاعات را تولید، پردازش و ذخیرهسازی کنیم. فناوری نانو با کوچکسازی اجزای ادوات ذخیرهسازی اطلاعات، این امکان را فراهم کرده و روزبه روز، با پیشرفت فناوری در حال توسعه است.

امروزه، از سه روش کلی برای ذخیرهسازی اطلاعات استفاده می شود و فناوری نانو در بهبود هر یک از این سه روش نقشى تعيين كننده دارد.

### 💿 ذخیرہسازی مغناطیسے اطلاعات

برای اولین بار در ۱۹۲۸ میلادی، از خواص مغناطیسی ذرات اکسید آهن برای ذخیرهسازی اطلاعات در نوارهای مغناطیسی استفاده شد. این امر انقلابی عظیم در ذخیرهسازی دادهها ایجاد کرد و درنهایت، به فراگیر شدن انواع دستگاههای ضبط و پخش صوت و تصویر خانگی منجر گردید. پیش از نوارهای مغناطیسی از کارتهای سوراخدار ٔ برای ذخیرهسازی اطلاعات و تبادل آنها بین رایانهها استفاده می شد. پس از نوارهای مغناطیسی و در ۱۹۵۶ میلادی، اولين نسل ديسكهاي مغناطيسي سخت (HDD) أساخته شدند. نخستين ديسك سخت ساختهشده فقط مي توانست ۵ مگابایت (MB) اطلاعات را ذخیره کند (شکل ۹). جالب اینجاست که امروزه، حجم عکس دوربین گوشیهای همراه بیش از این مقدار است.

در ۱۹۶۰ میلادی، اولین نوع دیسک نرم موسوم به فلاپی دیسک معرفی شد. با ورود این نسل از دیسکها به بازار، امکان جابهجایی راحت و کمهزینهٔ اطلاعات به وجود آمد و در گسترش استفاده از انواع رایانهها نقش بسزایی داشت. با این حال، گسترش استفاده از رایانهها و تمایل زیاد برای تبدیل بسیاری از اسناد به محتوای الکترونیکی و نیز، افزایش سرعت تولید انواع محتوای دیجیتال و الکترونیک موجب شد تقاضاهای بسیاری برای بهبود کیفیت، کاهش هزینه و افزایش حجم ذخیرهسازی اطلاعات صورت بگیرد.



شکل ۹: تصویری از اولین دیسک سخت

- 1- Punch card
- 2- Hard disk drive
- 3- Megabyte
- 4- Floppy disk

اساس ذخیرهسازی مغناطیسی اطلاعات استفاده از جهتگیری مغناطیسی مواد مغناطیسی مورد استفاده در این دیسکها برای نشاندادن صفر و یکهای مورد استفاده برای ذخیرهسازی اطلاعات است. شکل ۱۰ طرحی ساده از ساختار درونی یک دیسک سخت مغناطیسی در حین ذخیرهسازی اطلاعات را نشان میدهد. با توجه به شکل ۱۰، برای افزایش ظرفیت ذخیرهسازی دادهها باید امکان نوشتن تعداد بیتهای بیشتر در مساحت مشخص افزایش یابد یا به عبارت دیگر، اندازهٔ بیتها کوچکتر شود.



امروزه، با پیشرفتهای صورت گرفته در زمینههای مختلف علم مواد و فناوری نانو، امکان مطالعهٔ دقیق خواص مواد مغناطیسی، بهویژه در ابعاد نانو، میسر شده است. این امر موجب شده است که نانومواد مغناطیسی کاربردهای فراوانی در عرصههای مختلف علم و فناوری پیدا کنند. همچنین، با تکیه بر دستاوردهای فناوری نانو در زمینهٔ نانومواد مغناطیسی، امکان ساخت حافظههای مغناطیسی با حجم ذخیره سازی بسیار بالا در ابعاد فیزیکی کوچک میسر شده است. کاهش اندازهٔ بیتهای مغناطیسی و کاربرد آرایههایی از بیتهای مغناطیسی نانوساختار به جای بیتهای مغناطیسی گرانولی<sup>۱</sup>، که در دیسکهای سخت معمولی استفاده میشود، سبب افزایش حجم ذخیره سازی اطلاعات در دیسکهای سخت مغناطیسی می گردد.

شکل ۱۱ طرحی از تفاوت حافظههای مغناطیسی معمولی و حافظههای مغناطیسی را که با آرایهای از نانوذرات مغناطیسی ساخته شدهاند، نشان میدهد. همانطور که در این شکل مشاهده میکنید، استفاده از آرایهای از نانوذرات مغناطیسی میتواند کیفیت و حجم ذخیرهسازی دادهها در حافظههای مغناطیسی را به مقدار قابلتوجهی افزایش دهد. این امر، در کنار افزایش حجم ذخیرهسازی، عمر مفید حافظهها را زیاد میکند و خطر از دسترفتن دادهها را تا حد زیادی میکاهد.

کاهش اندازهٔ بیتهای مغناطیسی آنها را به بیتهای متشکل از یک حوزهٔ مغناطیسی تبدیل میکند؛ در حالیکه ممکن است در دیسکهای معمولی، یک بیت بیش از یک حوزهٔ مغناطیسی داشته باشد. این امر موجب میگردد که کیفیت ذخیرهسازی داده کاهش یابد و نوشتن و خواندن آن سخت شود. کاهش اندازهٔ بیتها، تا زمانی که اندازهٔ این بیتها از حجم انسداد کمتر نشود و به یک ابرپارامغناطیس تبدیل نگردد، علاوه بر افزایش ظرفیت ذخیرهسازی اطلاعات، با تبدیل ماده به فرومغناطیس نرم موجب تسهیل روند نوشتن و پاککردن اطلاعات میشود.

کاربردهای فناوری

3

فصل سرم



شکل ۱۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح دو دیسک مغناطیسی را نشان میدهد که از بیتهای مغناطیسی به صورت آرایه ای از نانوذرات و گرانول های دارای دانه بندی برای ذخیره سازی استفاده می کنند. این تصاویر به خوبی نشان دهندهٔ بهبود کیفی محیط ذخیره سازی داده ها در صورت استفاده از بیتهای نانومقیاس است. استفاده از فناوری های پیشرفته برای تولید لایه های نازک و کاربرد انواع آرایه های مغناطیسی موجب افزایش چشم گیر ظرفیت داده در دیسکهای سخت شده است؛ به نحوی که امروزه ظرفیت معمول دیسکهای سخت به چندین ترابایت (TB)<sup>۱</sup> رسیده است. همان طور که گفته شد، اولین دیسک سخت ساخته شده فقط ۵ مگابایت گنجایش داشت! این یعنی افزایش ظرفیت یک میلیون برابری که فقط با کمک فناوری نانو میسر شده است.



الأخيروسازي نوري اطلاعات

ذخیرهسازی نوری نوع دیگری از فرآیند ذخیرهسازی دادههای دیجیتال است که کمک بسیاری به تولید، تبادل و ذخیرهسازی اطلاعات دیجیتال میکند. در این روش، از پرتوهای نور برای نوشتن و خواندن اطلاعات بر روی دیسکهای نوری استفاده میشود. اولین نسل از دیسکهای نوری در ۱۹۸۲ میلادی، با نام دیسک فشرده (CD) <sup>ا</sup> به بازار عرضه شد و گنجایشی برابر MB ۷۰۰ داشت. نسل بعدی دیسکهای نوری، با فاصلهٔ کمی از دیسک فشرده، با نامهای دیسک همهکارهٔ دیجیتال (DVD)<sup>۲</sup> و دیسک پرتو آبی (BD)<sup>۳</sup> بهترتیب، در سالهای ۱۹۹۵ و ۲۰۰۶ وارد بازار شدند. این دو نوع جدید از دیسکهای نوری انواع و ظرفیتهای مختلفی دارند. ظرفیت معمول برای دیسک همهکاره برابر ۴/۷ گیگا بایت (GB)<sup>۴</sup> و برای دیسکهای پرتو آبی برابر ۲۵ گیگا بایت است.

افزایش بیش از پنج برابری ظرفیت ذخیرهسازی داده برای نسلهای مختلف از دیسکهای نوری نشاندهندهٔ بهبود چشم گیر فناوری در ساخت آنهاست. در تمام دیسکهای نوری، ذخیرهسازی اطلاعات با تاباندن پرتو لیزر بر روی دیسک نوری و ایجاد الگوهای خاص صورت می گیرد. پس از شکل گیری این الگوها، بازتاب پرتو نور لیزر تابانده شده به سطح در محل ایجاد الگوهای خاص صورت می گیرد. پس از شکل گیری این الگوها، بازتاب پرتو نور لیزر تابانده هم از طریق تابیدن پرتو لیزر و انعکاس پرتو از سطح بدون الگو خواهد بود. براین اساس، خواندن اطلاعات ذخیره شده هم از طریق الگوهای ایجادشده بر روی سطح یک دیسک و تشخیص الگوهای ایجادشده صورت می گیرد. شکل ۱۳ تصویری از رخ داد، اگر بتوان الگوهای کوچکتری بر روی دیسکهای نوری ایجاد کرد و اطلاعات ذخیره شده را مورد بازخوانی قرار رخ داد، اگر بتوان الگوهای کوچکتری بر روی دیسکهای نوری ایجاد کرد و اطلاعات ذخیره شده را مورد بازخوانی قرار داده طرفیت ذخیرهسازی اطلاعات در این دیسکها افزایش می یابد. آنچه موجب افزایش تقریباً پنج برابری گنجایش بر روی سطح آنها ایجاد گردیده است. برای مثال، اندازهٔ گام<sup>4</sup> و الگوهایی است که برای ذخیره سازی داده بر روی سطح آنها ایجاد گردیده است. برای مثال، اندازهٔ گام دورای مرد برابر mm که برای ذخیره سازی داده دور محل می ای معمولی، اندازهٔ گام ۳۲۰ است. در عمل، اندازهٔ گام از نسلی به نسل دیگر از دیسکهای نوری تقریباً نصف شده است. شکل ۱۴ روند کوچکشدن اجزای درونی دیسکهای نوری را نشان می دهد.



شکل ۱۳: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از الگوهای ایجادشده بر روی سطح دیسک فشرده در اثر ذخیرهٔ اطلاعات [۳۳]



براساس دادههای مرجع [۳۳])

- 1- Compact disc
- 2- Digital versatile disc
- 3- Blu-ray disc
- 4- Gigabyte
- 5- Pitch size

این روند کوچکسازی موجب افزایش چشم گیر گنجایش داده بر روی سطح مشخصی از دیسکهای نوری شده است؛ بهنحوی که امروزه ظرفیت داده در دیسکهای پرتو آبی چندلایه برابر GB ۱۰۰ است. این روند افزایشی مدیون رویکرد کوچکسازی است که در فرایندهای ساخت این دیسکها مدنظر قرار گرفته است.

#### 🔘 ذخیرہسازی الکترونیکے اطلاعات

امروزه، متداول ترین راه برای ذخیره سازی ایمن اطلاعات در حجم بالا، استفاده از حافظههای الکترونیکی است که دراصطلاح، حافظههای فلش<sup>۱</sup> نامیده می شوند. گسترش این گروه از حافظهها به قدری است که در بسیاری از موارد، جایگزین دیسکها نوری شده است. امروزه، انواع حافظههای فلش به صورت فراگیر در انواع دستگاههای الکترونیکی استفاده می شوند. کارتهای حافظه گوشی تلفنهای همراه مثالی از ذخیره سازی الکترونیکی داده هاست. حافظههای فلش از سال ۲۰۰۰ میلادی وارد بازار شدند و با وجود اینکه گنجایش، سرعت و کیفیت این نوع حافظهها در حال افازایش است، قیمت آنها روندی کاهشی دارد.

این نوع از حافظهها در آغاز، با اینکه قیمت بسیار بالایی داشتند، دارای گنجایش اطلاعات پایینی بودند. با وجود این روزبهروز و با پیشرفت فرایند ساخت مدارهای مجتمع الکترونیک و ترانزیستورها، فناوری ساخت این نوع حافظهها هم بهبود یافت. امروزه، این نوع حافظه با گنجایش دادهای از چند ده گیگابایت تا دو ترابایت (سال ۲۰۱۸) به بازار عرضه می شود. سرعت نوشتن و خواندن داده در این حافظهها بسیار زیاد است و عمر مفید بسیار بالایی دارند؛ به نحوی که نمونههای معمول حافظههای فلش قابلیت چرخهٔ نوشتن و خواندنی بیش از ۱۰۰٬۰۰۰ بار را دارند و بدون نیاز به شرایط نگهداری خاص، می توانند عمری حدود ۱۰ الی ۱۰۰ سال داشته باشند. چنین عمر زیادی برای هیچ یک از نمونههای پیشین ذخیرهٔ اطلاعات قابل تصور نبود.

درواقع، آنچه درون حافظههای الکترونیکی وظیفهٔ نگهداری دادهها را بر عهده دارد، نوع خاصی از ترانزیستورهاست؛ ازاینرو، با پیشرفت فناوریهای تولید ترانزیستورها و کاهش اندازهٔ آنها، ظرفیت حافظههای الکترونیکی هم افزایش مییابد. امروزه، حافظههای فلش با فناوری ۱۰ mm تولید میشود که حاصل آن ظرفیت دو ترابایتی در مساحتی حدود ۱۲ cm است. بدون بهره گیری از فناوری نانو در فرایندهای ساخت و تولید مدارهای مجتمع تشکیل دهندهٔ حافظههای الکترونیکی، رسیدن به این گنجایش بسیار بالای ذخیره سازی اطلاعات ناممکن است.

# 🗞 انرژی خورشید

در همهٔ روزهای سال، حتی زمانی که خورشید پشت ابرها پنهان شده است، نور خورشید زمین را گرم میکند و به آن زندگی میبخشد. نور خورشید دارای انرژی بسیار زیادی است که بهتنهایی میتواند انرژی موردنیاز کل زمین را تأمین کند. شاید آبگرمکنهای خورشیدی را دیده باشید که روی پشتبام برخی خانهها نصب شدهاند و آبگرم موردنیاز را فقط با استفاده از انرژی خورشیدی تأمین میکنند. شکل (۱۵– آ) تصویری از یک آبگرمکن خورشیدی نشان میدهد. همان طور که در شکل (۱۵– ب) مشاهده میکنید، کورههای خورشیدی<sup>۲</sup> هم از انرژی گرمایی نور خورشید استفاده میکنند و با متمرکز کردن پرتوهای نور، حرارت بسیار بالایی را در یک نقطه ایجاد میکنند. از این حرارت برای تولید بخار آبداغ و به چرخش درآوردن توربینهای نیروگاه برق استفاده میشود. مواردی که ذکر شد، مثال هایی از تبدیل انرژی تابشی خورشید به سایر شکلهای انرژی از طریق تبدیل پرتوهای پرتوان نور به حرارتاند. آنچه انرژی نهفته یاربردهای فناوری نانو

קר בדילכ

در پرتوهای نور را منحصربهفرد می *ک*ند، امکان تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی است. سلولهای خورشیدی<sup>۱</sup> این کار را با بهرهگیری از خواص نیمهرساناها ممکن میسازند.

فارغ از طول عمر اجرام کیهانی، انرژی خورشید برای زمین نامحدود و پایان ناپذیر است و هیچ آلودگی یا پسماند مضری تولید نمی کند؛ همچنین، برای خنک کردن به آب نیاز ندارد و از همه مهمتر، رایگان است و به مقدار کافی در اختیار اکثریت مردم جهان قرار دارد. در قرون گذشته، انرژی خورشید و مزایای آن به خوبی شناخته شده بود ولی بالابودن هزینهٔ اولیهٔ چنین سامانه هایی از یک طرف و عرضهٔ نفت و گاز خام و به قیمت ارزان از طرف دیگر، سد راه پیشرفت در فناوری های تولید مستقیم انرژی از نور خورشید بود. با افزایش مصرف جهانی انرژی در سال های اخیر، افزایش تولید گازهای گلخانه ای و آلودگی بیش از حد محیط زیست و درنهایت، افزایش قیمت نفت کشورهای صنعتی مجبور شدند به موضوع تولید انرژی از راه های دیگر (غیر از سوختهای فسیلی) توجه جدی تری کنوره ای مسیر، استفاده از انرژی های تجدید پذیر<sup>۲</sup>، به ویژه انرژی خورشیدی، بسیار مورد توجه کشورها قرار گرفته است.



## 🖲 سلول های خورشیدی

سلول خورشیدی یک قطعهٔ الکترونیکی است که میتواند انرژی خورشید را بهطورمستقیم و بدون اتصال به منبع تغذیهٔ خارجی، به انرژی الکتریکی تبدیل کند. شاید روی ماشین حساب یا چراغهای راهنمایی و رانندگی نمونههایی از سلولهای خورشیدی دیده باشید. همان طور که در شکل ۱۶ مشاهده میکنید، از کنار هم قرارگرفتن تعداد زیادی سلول خورشیدی یک صفحهٔ خورشیدی شکل میگیرد. در ایستگاه فضایی و ماهوارههای موجود در مدار زمین از صفحات خورشیدی به منظور تأمین برق ایستگاهها استفاده میشود. امروزه، صفحات خورشیدی در مکانهایی که شبکهٔ توزیع برق وجود دارد هم کاربرد دارند. هدف از به کار بردن سلولهای خورشیدی کم کردن استفاده از سوختهای فسیلی، کمک به محیطزیست و کاهش هزینهها است.

در سلولهای خورشیدی از پدیده فوتوولتائیک<sup>۳</sup> و خواص نیمهرساناها برای تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی استفاده می شود؛ براین اساس، سلولهای فوتوولتائیک<sup><sup>۴</sup> هم نامیده می شوند. اثر فوتوولتاییک به حالتی گفته می شود که با قرار گرفتن ماده در مقابل نور، یک جریان الکتریکی و متناظر با آن، یک اختلاف پتانسیل الکتریکی در آن ماده شکل می گیرد. درواقع، فتوولتائیک پدیده ای است که در آن انرژی خورشیدی به طور مستقیم، به انرژی الکتریسیته تبدیل می شود و معنای لغوی آن، الکتریسیته یا همان جریان الکتریکی ناشی از نور خور شید است.</sup>

- 1- Solar cell
- 2- Renewable energy
- 3- Photovoltaic effect
- 4- Photovoltaic cell



همانطور که میدانید، جریان الکتریکی به دلیل حرکت الکترونها درون مادهٔ رسانا ایجاد میشود. بنابراین، برای ایجاد یک جریان الکتریکی ابتدا باید تعدادی الکترون از بند اتمهای ماده آزاد گردد و سپس، به حرکت در مسیر خاصی وادار شود. در مواد رسانا، الکترونها به صورت آزاد وجود دارند اما بدون اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی خارجی نمیتوان آنها را وادار به حرکت کرد.

در فصل دوم دیدید که الکترونهای نوار ظرفیت مواد نیمهرسانا با دریافت انرژی کافی میتوانند از سد شکاف انرژی عبور کنند و به نوار رسانش بروند (شکل ۱۷). انرژی بخشی از فوتونهای طیف نور مرئی تقریباً اندازهٔ شکاف انرژی برخی مواد نیمهرساناست؛ ازاینرو، میتوان با تحریک الکترونهای آنها از طریق پرتوهای نور مرئی و ایجاد الکترونهای برانگیخته، جریان الکتریکی خالصی تولید کرد که حاصل تبدیل انرژی تابشی به انرژی الکتریکی است. این امر دستیابی به انرژی تجدیدپذیر خورشیدی از طریق ساخت سلولهای خورشیدی نیمهرسانا را فراهم میکند.



هر فوتون با برخورد به مادهٔ نیمهرسانا یک جفت الکترون- حفره تولید میکند (شکل ۱۷)؛ به این صورت که به محض برانگیخته شدن یک الکترون تحت تأثیر برخورد فوتون و جدا شدن آن از نوار ظرفیت ماده، به نوار هدایت گذار میکند و به جای آن، یک حفره در نوار ظرفیت اتم ایجاد میشود. پس از اینکه یک الکترون با دریافت انرژی بر سد پتانسیل الکتریکی شکاف انرژی غلبه کرد و به نوار هدایت رفت، تمایلی برای باقیماندن در آن ندارد و به سرعت، میخواهد به نوار ظرفیت بر گردد تا به سطح انرژی پایدار برسد. اگر این اتفاق که به آن بازترکیب الکترون – حفره می گویند رخ دهد، دیگر نمی توان از الکترون تولیدشده استفاده کرد؛ درنتیجه امکان تولید هیچ جریان الکتریکیای وجود ندارد. ازاینرو، باید شرایطی فراهم شود تا الکترون الکترونی ایجادشده در اثر تحریک نوری، در مداری خارجی جریان بیابند و انرژی خورشیدی جذب شده را به شکل انرژی الکتریکی تحویل دهند. ساخت سلولهای خورشیدی راه حلی ارائه شده است. این راه حل عبارت است از به کاربردن اتصال نیمهرساناهای مثبت و منفی که دراصطلاح، اتصال n-p نامیده می شود. در محل این پیوند، یونهای مثبت و منفی در مجاورت هم قرار می گیرند (شکل ۱۸). این نحوهٔ آرایش بارهای مثبت و منفی امکان جداکردن الکترونها و حفرههای ایجادشده را فراهم می کند و درنتیجه، موجب ایجاد جریان خالص الکتریکی می شود. این ناحیه دراصطلاح، ناحیهٔ تخلیه<sup>۱</sup> نامیده می شود.

در ساخت سلولهای خورشیدی لایهٔ تشکیل شده از نیمهرسانای نوع منفی (لایهٔ n) تا حدممکن نازک ساخته می شود (در حدود ۱۹ ۹) تا پرتو نور بتواند به محل پیوند p-n و نیمهرسانای مثبت (لایهٔ p) برسد. با تابش نور به سلول خور شیدی، در محل اتصال p-n زوج الکترون حفره شکل می گیرد.



منفی در محل اتصال

الکترونهای ایجادشده در لایهٔ p به دلیل جاذبهٔ یونهای مثبت در سمت نیمهرسانای منفی، از محل اتصال گذر میکنند و وارد نیمهرسانای منفی میشوند. بههمین ترتیب، یونهای منفی حفرههای شکل گرفته در لایهٔ n را به سمت نیمهرسانای مثبت میکشند و الکترونها و حفرهها پیش از باز ترکیب، در ناحیهٔ تخلیه از یکدیگر جدا میشوند (شکل ۱۹). درنتیجه، تجمعی از حاملهای بار منفی (الکترونها) در لایهٔ منفی و تجمعی از حاملهای بار مثبت (حفرهها) در لایهٔ مثبت به وجود می آید و یک اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد میکند. در چنین شرایطی، اگر از طریق یک مدار الکتریکی اتصالی بین کاتد (لایهٔ منفی) و آند (لایهٔ مثبت) سلول خورشیدی برقرار شود، الکترونها به دلیل اختلاف پتانسیل ایجاد شده، از طریق این مدار به جریان درمی آیند و انرژی خورشیدی دریافتی را به مدار تحویل می دهند. این اتصال توسط الکترودهایی در خورشیدی به کاتد راه می یابند و با حفرههای موجود در لایهٔ نوع p ترکیب می شوند.



گتــل سروم کاربردهای فناوری نانر

مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك

λ١

سلولهای خورشیدی، در کنار برخورداری از مزیتهایی برای کاهش آلودگی هوا، محدودیتهایی هم دارند. شدت تابش خورشید در زمان و مکانهای مختلف یکی نیست؛ برای مثال در زمستان یا هوای ابری و در مناطق کوهستانی، در مقایسه با دشتها، شدت تابش خورشید بهطور متوسط کمتر است. همچنین، میزان انرژی تولیدی توسط سلولهای خورشیدی بهطور مستقیم، به مساحت صفحات وابسته است؛ ازاینرو، باید برای تولید مقدار مناسب انرژی از طریق سلولهای خورشیدی تعداد زیادی سلول خورشیدی نصب شود که هزینهٔ اولیهٔ بالایی در پی دارد.

محدودیت دیگر سلولهای خورشیدی این است که بازده شان به شدت نوری که به آنها می تابد بستگی دارد؛ برای مثال اگر در محیطی باشید که برخی موانع سبب حذف یا تضعیف قسمتی از نور تابیده شده از خورشید شوند، بازده سلول خورشیدی پایین می آید. نشستن گردوخاک و آلودگی روی صفحات خورشیدی هم از بازده آنها می کاهد. نور خورشید شامل طیف وسیعی از طول موجهاست که فقط ممکن است بخشی از آن به تولید جریان الکتریکی منجر شود؛ درواقع، همان بخشی که انرژی بیشتری از شکاف انرژی مادهٔ نیمه رسانای مورداستفاده در ساخت سلول های خورشیدی دارد. در مجموع، این عوامل موجب می گردند که بازده سلول های خورشیدی، که با فناوری های کنونی ساخته می شوند، در بهترین حالت کمتر از ۳۰ ٪ باشد. امروزه، دانشمندان در تلاش اند که برخی از این چالش ها و محدودیت ها را به کمک فناوری نانو حل کنند.

## 💿 نسل های مختلف سلول های خورشیدی

تاکنون از مواد مختلفی برای ساخت سلولهای خورشیدی استفاده شده است و هر کدام هزینهٔ ساخت و بازده انرژی متفاوتی دارند. سلولهای خورشیدی، با توجه به مواد استفادهشده در آنها، به چهار نسل تقسیم میشوند: **نسل اول:** در نسل اول، سلولهای خورشیدی مبتنی بر ویفرهای ضخیم سیلیکون تکبلور ساخته شدهاند. این نسل

علی رفع بازده بالای انرژی (در حدود ٪ ۲۰ – ۱۵)، بیشترین هزینهٔ تولید را در بین سلولهای خورشیدی دارد. درحال حاضر، سلولهای خورشیدی نسل اول متداولترین نوع سلول خورشیدی به شمار می روند.

**نسل دوم:** اقدامات صورت گرفته به منظور کاهش هزینهٔ سلولهای خورشیدی سیلیکونی نسل اول به ساخت نسل دوم این سلولها منجر شد. فناوری سلولهای خورشیدی نسل دوم مبتنی بر موادی است که در حین توسعهٔ سلولهای خورشیدی نسل اول شناسایی شدند. سلولهای خورشیدی نسل دوم مبتنی بر سیلیکون بی شکل و لایههای نازکاند و انواع لایههای نازک، ازجمله کادمیم تلوراید (CdTe)، کادمیم سلنید (cdSe) و مس ایندیوم گالیم دی سلنید (CiGS – CuInGaSe<sub>2</sub>) را شامل می شوند. نسل دوم سلولهای خورشیدی، در مقایسه با نسل اول، بازده کمتری دارند (حدود ٪ ۱۵ – ۱۰)؛ بااین حال، به دلیل عدم استفاده از ویفرهای سیلیکونی تک بلور، قیمت پایین تری در مقایسه با نسل اول دارند.

> سلولهای خورشیدی نسل دوم تجاریسازی شدهاند و هماکنون، کاربرد وسیعی در زمینههای مختلف دارند. مهمترین مزیت سلولهای خورشیدی نسل دوم امکان ساخت سلولهای خورشیدی انعطاف پذیر است (شکل ۲۰). این ویژگی مدیون استفاده از لایههای نازک در ساخت این نسل از سلولهای خورشیدی است که به آنها این امکان را میدهد تا بتوانند روی زیرلایههای انعطاف پذیر لایهنشانی کنند. از آنجاکه فرایند تولید این نسل از سلولهای خورشیدی شامل فرایندهای خلاء و دمای



شکل ۲۰: تصویری از یک سلول خورشیدی انعطاف پذیر

بالا است، هزینهٔ تولید آنها بسیار بالا میرود. همچنین، این نسل از سلولهای خورشیدی از عناصر نادری مانند کادمیم استفاده میکنند که عاملی بازدارنده در گسترش آنها به شمار میرود.

**نسل سوم**: هزینهٔ بالای تولید و بازدهی پایین سلولهای خورشیدی نسل دوم، در مقایسه با سلولهای نسل اول، موجب شد که سلولهای خورشیدی نسل سوم با هدف افزایش بازدهی و کاهش قیمت طراحی شوند. معرفی این نسل پس از آغاز رقابت بر سر طراحی مواد در ابعاد نانو صورت گرفت. در این دوران، برای اولینبار در فرایند ساخت سلولهای خورشیدی به نکاتی همچون بهبود فرایند به دام انداختن انرژی خورشیدی و تسهیل جریان حاملهای بار درون ساختار سلول خورشیدی توجه شد. نسل سوم سلولهای خورشیدی حاصل چند فناوری لایه نازک است. یکی از این فناوریها با معرفی مواد آلی، که خاصیت فتوولتائیک از خود نشان میدهند، ظهور کرد. این مواد هزینهٔ تولید سلولهای خورشیدی را پایین آورد و جذب نور را افزایش داد. سلولهای خورشیدی دووجهی<sup>1</sup> (شکل ۲۱)، سلولهای خورشیدی نانوبلورین، سلولهای خورشیدی حساس شده با رنگدانه، سلولهای خورشیدی پلیمری، سلولهای خورشیدی مبتنی بر نقاط کوانتومی و سلولهای خورشیدی چنداتصالی نمونههایی از این نسل محسوب میشوند. در این میان، سلولهای خورشیدی دورجهی ساختار جالبی برای افزایش جذب نور خورشید از این نسل محسوب میشوند. در این میان، سلولهای



در شرایط فعلی، سلولهای خورشیدی نسل سوم به دلیل هزینههای تولید بالا کاربرد تجاری چندانی ندارند و کارایی و پایداریشان نیز، در مقایسه با دو نسل پیشین، پایین است. ازاینرو، این نسل از سلولهای خورشیدی علیرغم موفقیتهایی که دارند، برای رقابت با نسلهای پیشین به بهبود عملکرد نیازمندند.

**نسل چهارم:** اخیراً نسل چهارم سلولهای خورشیدی معرفی شدهاند که فناوری ساختشان ترکیبی از هزینهٔ تولید پایین، انعطاف پذیری لایههای نازک پلیمری و پایداری مواد نانوساختار غیرآلی نوین را عرضه میکنند. معماری این نسل از سلولهای خورشیدی محصولی با هزینهٔ پایین تولید را در اولویت قرار داده است و از ترکیبهای غیرآلی نوین برای افزایش کارایی، کسب انرژی، بهبود جدایش و انتقال بار الکتریکی بهره میگیرد. سلولهای خورشیدی نسل چهارم ساختاری از ترکیب چند نوع نانوماده دارند. این سلولها از هزینهٔ پایین و انعطاف پذیری لایههای نازک پلیمرهای رسانا (مواد آلی) بهره میبرند و به دلیل استفاده از نانوساختارهای نوین (مواد غیر آلی) عمری طولانی دارند. این ساختار آلی – غیرآلی علاوه بر اینکه سبب بهبود کسب انرژی خورشیدی و تبدیل آن به انرژی الکتریکی، در مقایسه با سلولهای خورشیدی نسل سوم، شده است و کارایی بهتری را عرضه کرده، مزیت هزینهٔ تولید پایین را هم به همراه دارد. این نسل از سلولهای خورشیدی برای رسیدن به چنین مزایایی در ابعاد نانو مهندسی میشوند و این باور وجود دارد که نسل از سلولهای خورشیدی برای رسیدن به چنین مزایایی در اعاد نانو مهندسی میشوند و این باور وجود دارد که

1- Double-sided solar cell

نوع سلولهای خورشیدی را، که سلول خورشیدی ترکیبی نانوبلورین است، عرضه می کند. نسل بعد: در بیشتر سلولهای خورشیدی، که در چهار نسل جای می گیرند، از مواد نیمهرسانای غیرآلی بهعنوان جزء مولد الکترون- حفره استفاده می شود. این مواد غیرآلی از نظر جذب و تبدیل انرژی، در مقایسه مواد آلی، کارایی پایین تری دارند؛ برای مثال، در سلولهای خورشیدی مبتنی بر سیلیکون، هر فوتون ورودی موجب برانگیزش یک الکترون می شود؛ این در حالی است که مواد آلی (مانند آنچه به طور طبیعی در برگ سبز گیاهان وجود دارد) با جذب همان مقدار نور می توانند دو الکترون برانگیخته ایجاد کنند. این امر نویدبخش قابلیت دو برابر کردن ظرفیت تولید انرژی با استفاده از مواد آلی در ساخل های خورشیدی است. چنین بازدهی انرژی با تکیه بر مواد نیمهرسانای غیرآلی غیر ممکن است. این سلولهای خورشیدی از آلی، به ویژه ساختارهای زیستی، برای به دام انداختن و تبدیل انرژی خورشید استفاده می کنند و سلولهای خورشیدی نسل بعد به شمار می روند.

🔘 فناوری نانو چگونه مےتواند عملکرد سلول های خورشیدی را بهبود دهد؟

با آنچه دربارهٔ نسلهای مختلف سلولهای خورشیدی بیان شد، سلولهای خورشیدی نسل چهارم محصول مستقیم فناوری نانو هستند. علاوه بر این، فناوری نانو از راههای مختلف به کمک فناوریهای متداول ساخت سلولهای خورشیدی آمده است. این کمکها را میتوان در دو بخش فرایند ساخت سلول و بهبود مواد استفادهشده در سلولهای خورشیدی بررسی کرد. فناوری نانو پیشرفتهای چشم گیری در هر دو بخش ایجاد کرده است و حاصل آن افزایش کارایی و کاهش قیمت تمامشده برای سلولهای خورشیدی است. انواع لایههای نازک، نانوساختارهای کربنی و نانوذرات از جمله نانوموادیاند که به بهبود عملکرد سلولهای خورشیدی کمک بسیاری کردهاند.

مهمترین اثرات بهبوددهندهٔ فناوری نانو بر کارایی سلولهای خورشیدی، معرفی روشهای جدید ساخت اجزای این مولدهای انرژی دوستدار محیطزیست است. روشهای متنوع و جدیدی که با هدف ساخت انواع نانوساختارها توسعه یافتهاند، ابراز توانمندی در اختیار پژوهشگران و صنعتگران حوزهٔ سلولهای خورشیدی قرار میدهند. انواع نانوساختارهای صفر بعدی مانند فولرینها، نانوذرات فلزی، نقاط کوانتومی؛ نانوساختارهای یک بعدی مانند نانوسیمها، نانولولهها و نانوساختارهای دوبعدی این امکان را فراهم کردهاند که معماریهای متنوعی برای سلولهای خورشیدی مورد مطالعه قرار گیرد.

امروزه، انواع مواد نانوساختار در ساخت سلولهای خورشیدی به کار میروند. با اینحال، نانوساختارهای کربنی بهدلیل خواص نوری، فیزیکی و شیمیایی منحصربهفردشان، بهعنوان موادی ارزان و پاک برای تولید انرژی پیشنهاد میشوند. راهکارهایی برای افزایش میزان تبدیل انرژی نورانی خورشید ارائه شده است؛ ازجمله آنها میتوان به استفاده از نانوساختارهای کربنی در نقش الکترودهای حساس به نور با منظور تبدیل انرژی نورانی خورشید به جریان الکتریسیته اشاره کرد.

یکی از مشکلات مهم، که انواع سلولهای خورشیدی با آن روبهرو هستند، اتلاف انرژی از طریق انعکاس قسمتی از نور دریافتی است. همان گونه که در شکل ۲۲ مشاهده میکنید، استفاده از لایههای ضدبازتاب<sup>(</sup>، که پرتوهای خورشید را درون ساختار سلول خورشیدی به دام میاندازند، یکی از روشهای ساده ولی کارآمد برای افزایش بازدهی انواع سلولهای خورشیدی است. کربن بیشکل یکی از شکلهای کربن است که از خود خاصیت نیمهرسانایی نوع p را بهصورت ضعیف نشان میدهد. برای ایجاد لایهٔ ضدانعکاس از کربن بیشکل بر روی سطح سلولهای خورشیدی استفاده میشود. این لایه از هدررفتن انرژی جلوگیری میکند و کارایی سلولها را بسیار افزایش میدهد. کاربردهای فناوری نانو

وتساله مسراط

علاوه بر سطوح ضدبازتاب، سطحهای خود تمیزشونده هم از مواردی تشکیل شدهاند که بهطور غیرمستقیم، با تمیز نگهداشتن سطح سلولهای خورشیدی و هدایت نور خورشید به درون آن، بازده انرژی سلولهای خورشیدی را افزایش میدهد. انواع سطوح ضدبازتاب، که همزمان خودتمیزشونده هم هستند، کارایی صفحههای خورشیدی را به مقدار چشمگیری افزایش میدهند و هزینههای نگهداری آنها را میکاهند.



فولرینها پذیرندههای خوبی برای الکترون بهشمار میروند؛ ازاینرو، استفاده از آنها در سلولهای خورشیدی، بهویژه سلولهای خورشیدی آلی، موجب بهبود راندمان از طریق افزایش جدایش الکترون- حفره میشود. استفاده از نانولولههای کربنی و گرافن در فوتوالکترود، به دلیل ساختار یکبعدی کربن و دوبعدی گرافن و درنتیجه، رسانایی الکتریکی بسیار خوب، سبب افزایش سرعت انتقال الکترون میشود.

در ساخت سلولهای خورشیدی جدایش و انتقال زوج الکترون – حفرهٔ ایجادشده امری ضروری است. نانوموادی مانند نانولولههای کربنی بهراحتی میتوانند الکترونها را انتقال دهند. برخی فلزات، مانند طلا، توانایی بالایی برای انتقال حفره دارند. با این حال، فقط لایهای با ضخامت چند نانومتر از این فلز مانع بزرگی در راه انتقال نور به عمق سلول خورشیدی ایجاد میکند و درنتیجه، کارایی سلول خورشیدی را بسیار کاهش میدهد. این در حالی است که استفاده از نانوذرات طلا علاوه بر اینکه لایهای ناپیوسته ایجاد میکند اجازهٔ عبور نور به عمق سلول خورشیدی را میدهد و کارایی سلول را میافزاید، موجب افزایش جذب نور هم میشود. بنابراین، استفاده از نانوذرات فلزی در ساخت سلولهای خورشیدی موجب بهبود شدت جریان الکتریکی میشود. همچنین، استفاده از نانوذرات فلزی در بخش لایهٔ فعال سلولهای خورشیدی موجب پراکنش نور درون لایهٔ فعال و افزایش کارایی میگردد. نانوذرات طلا و نقره از جمله نانوذرات فلزی اند که برای بهبود کارایی سلولهای خورشیدی به کار گوفته شدهاند.

## 🚸 🔹 مواد هوشمند و کاربردهای آنها

موادی که انسان برای رفع نیازهای خود از آنها بهره میبرد مهمترین بخشهای زندگی او به شمار میروند. این اهمیت به حدی است که بخشهای مختلف تاریخ بشر با نام موادی نامگذاری شدهاند که بیشترین اهمیت و کاربرد را داشتهاند؛ مانند عصر آهن، عصر مس و عصر برنز. در دهههای اخیر نیز میتوان مشاهده کرد که آشنایی بشر با مواد جدید چگونه توانسته است زندگی او را تغییر دهد؛ برای مثال میتوان مواد نیمهرسانا، مواد مرکب یا کشف انواع نانوساختارهای کربنی را نام برد. در اواخر قرن بیستم، معرفی دستهای جدید از مواد، به نام مواد هوشمند <sup>1</sup>، نوید انقلابی دیگر و دورانی جدید در زندگی بشر را داد؛ موادی که کاربردهای فراوان و متنوعی در حوزههایی چون علم مواد، فناوری زیستی، فناوری تقلید زیستی<sup>۲</sup>، شبکههای عصبی و فناوری نانو دارند.

1- Smart material

2- Biomimetic

#### 回 چه موادی هوشمند هستند؟

مواد هوشمند موادی مهندسی شدهاند که طراحی خاص دارند و حداقل، یکی از خواص آنها تحت تأثیر تغییرات یک محرک محیطی، تغییری چشم گیر، تعریف شده و کنترل شدهای را نشان میدهد. درواقع، این گروه از مواد واکنش مشخص و تعریف شدهای به تغییرات محیطی از طریق تغییر در ویژگیهای خود دارند. با این تعریف شاید این گونه به نظر بیاید که بسیاری از مواد در تقسیم بندی مواد هو شمند قرار می گیرند. تقریباً تمامی مواد به نوعی به تغییرات محیط واکنش نشان می دهند؛ بنابراین، این هو شمندی باید دقیق تر تعریف گردد.

برای تعریف درست هوشمندی یک ماده، باید رفتار و پاسخ آن را مدنظر قرار داد. پاسخ مواد هوشمند به تغییرات محیط با سایر مواد متفاوت است. این پاسخ ویژگیهایی چون بازگشت پذیری، تکرار پذیری، تناسب با شدت محرک و قابل پیش بینی بودن دارد. هرچه این پاسخ با سرعت و دقت بیشتری همراه باشد و بازگشت پذیری بهتری داشته باشد، هوشمندانه تر خواهد بود. با درنظر گرفتن این ویژگیها، می توان میان پاسخ هوشمندانه و پاسخ عادی تفاوت قائل شد. یکی از متداول ترین مواد هوشمندی که با آن بر خورد کرده اید، شیشههای عینکی است که به تناسب شدت نور آفتاب تغییر رنگ می دهند و تیره می شوند و اگر تابش شدید خور شید حذف شود، مجدداً شفاف می شوند.

براساس توضیحاتی که داده شد، تعریف دقیق مواد هوشمند چنین است: مواد و ساختارهای هوشمند موادیاند که یک یا چند ویژگیشان به صورتمشخص و تعریفشدهای در پاسخ به یک محرک خارجی، مانند حرارت، نور، فشار، مواد شیمیایی، pH، میدانهای الکتریکی و مغناطیسی و حتی رطوبت تغییر میکند. این تغییر شامل مواردی چون تغییر اندازه و شکل، ویژگیهای مکانیکی و نوری یا رهایی یک ماده از درون ساختار است.

مواد هوشمند در سه سطح دستهبندی میشوند. سطح اول مواد تکفازیاند. دستهٔ دوم شامل مواد مرکبی است که با کنار هم قراردادن مواد، از ویژگیهای هر کدام از آنها و گاهی از همافزایی میانشان استفاده میکنند. دستهٔ سوم، سامانههای هوشمندیاند که از ترکیب اجزای مختلف تشکیل میشوند و مانند بدن موجودات زنده به تغییرات محیط واکنش نشان میدهند. مواد هوشمند گوناگونی تاکنون معرفی شدهاند که در ادامه، چند مورد از شناخته شده ترین شان معرفی می شوند.

## 💿 مثال ہایے از مواد ہوشمند

در این بخش، چند مورد از مواد هوشمند شناختهشده به اختصار معرفی میشوند. در مواردی که امکان تشریح دلیل رفتار هوشمند آنها وجود دارد، دلیل بروز این رفتار هوشمندانه در سطح کتاب، بررسی شده است.

## 🔸 اثر حافظة شكل

یکی از خواص جالب و کارآمدی، که گروهی از مواد هوشمند از خود نشان میدهند، اثر حافظهٔ شکل (SME)<sup>۱</sup> است. اثر حافظهٔ شکل اثری است که در آن، یک ماده شکل خاص خود در حالت اولیه را، که با نیروی مکانیکی خارجی از دست داده است، با تحریکی حرارتی بازیابی میکند (شکل ۲۳). معمولاً، وقتی یک مادهٔ معمولی با خمکردن به شکلی مشخص در میآید، به همان شکل باقی میماند و برای تغییر شکل باز هم باید نیروی مکانیکی به آن اعمال شود تا خم گردد؛ اما مادهای که خاصیت حافظهٔ شکل دارد، پس از تغییر شکل و خم شدن، فقط با گرمشدن به میزان مشخص به شکل اولیهای که در خاطر دارد باز میگردد. دو گروه عمدهٔ مواد وجود دارند که دارای خاصیت اثر حافظهٔ شکل هستند: آلیاژهای حافظهدار (SMA)<sup>۲</sup> و بسپارهای حافظهدار (SMP)<sup>۲</sup>. کاربردهای فناوری نانو

ger In mile

<sup>1-</sup> Shape memory effect

<sup>2-</sup> Shape memory alloy

<sup>3-</sup> Shape memory polymer



آلیاژهای حافظهدار یکی از شناخته شده ترین و پرکاربردترین مواد هوشمند به شمار میروند. امروزه، مواد ساخته شده از این آلیاژها کاربردهای فراوانی دارند؛ مثالهای بسیار متنوعی از استفادهٔ آلیاژهای حافظهدار در صنایع خودروسازی و هواپیماسازی (شکل ۲۴) وجود دارد. علاوه بر این، آلیاژهای حافظهدار در زندگی روزمرهٔ ما هم کاربرد دارند؛ مانند قابهای عینک، سامانههای هشدار حریق، سیمهای ارتودنسی<sup>۱</sup>، دستگاههای چای ساز و قهوه ساز و اندام مصنوعی. آلیاژهای متنوعی با ترکیب های شیمیایی مختلف وجود دارند (بیش از ۱۵ مورد) که از خود رفتار حافظهدار نشان داده اند؛ در این میان، آلیاژهایی چون مس-آلومینیوم-نیکل (CuAIN) و نیکل-تیتانیوم (NiTi) شهرت بیشتری دارند.



در میان کاربردهای متنوعی که آلیاژهای حافظهدار دارند، استفاده از این آلیاژها برای باز نگهداشتن عروق قلبی، که به دلایل مختلف مسدود شدهاند، کاربردی است که روزانه جان هزاران بیمار قلبی را نجات میدهد. این وسیلهٔ کاربردی، که استنت قلبی<sup>۲</sup> نام دارد، پس از قرارگرفتن درون رگ و همدماشدن با بدن انسان، بهآرامی به دیوارهٔ رگ فشار میآورد و آن را باز میکند (شکل ۲۵).



شکل ۲۵(آ): تصویری از استنت قلبی در دو حالت کشیده و باز شده، (ب) طرحی از یک استنت قلبی که رگ در حال بسته شدن را باز نگه میدار د

۱- ارتودنسی (Orthodontics) تخصصی در دندانپزشکی است که اقدام به تصحیح و مرتب کردن چیدمان دندانها با استفاده از سیمها و اتصالات خاص میکند.
2- Heat stent

گونهٔ دیگری از مواد خاصیت SME بسپارهای حافظهدار دارند. این مواد حافظهدار، در مقایسه با آلیاژهای حافظهدار، قیمت و دمای بازیابی پایین تری دارند و به همین دلیل، کاربردهای متنوع تری برای خود کسب کردهاند. شکل ۲۶ تصویری از یک نمونه از مواد SMP را نشان می دهد که پس از رسیدن به دمای بازیابی، در کمتر از ۱۰ ثانیه به شکل اولیهٔ خود باز می گردد.



شکل ۲۶: تصویرهای متوالی در بازهٔ زمانی ۱۰ ثانیه از یک بسپار حافظهدار که پس از افزایش دمای آن به C ۵۰۵ بهسرعت شکل اولیهٔ خود را بازیابی میکند [۳۵]

بسپارهای حافظهدار کاربردهای متنوعی در زمینههای مختلف دارند. سادگی فرایند تولید و امکان کنترل راحت خواص آنها موجب شده است که از این مواد در زمینههای مختلف، ازجمله کاربردهای پزشکی و بهداشتی، استفادهٔ فراوان شود. انواع چسبهای زخمبند و نخهای بخیه، که با همدما شدن با بدن انسان فشار بیشتری به زخم برای بستهشدن وارد میکنند، از موارد پرکاربرد چنین بسپارهایی به شمار میروند (شکل ۲۷).



بازآرایی و تغییر چیدمان اتمها یا مولکولهای مادهٔ دارای اثر SME در دمای خاص فرایندی است که موجب حافظهدارشدن مواد می گردد. این فرایند، که استحالهٔ فازی ( نامیده می شود، با افزایش دمای جسم و بازآرایی اتمها و مولکولها موجب می شود تا مادهٔ شکل اولیهٔ خود را بازیابی کند. چنین تبدیل فازی بین دو نوع چیدمان اتمی یا مولکولی متفاوتی اتفاق می افتد که یکی در دماهای معمولی و دیگری در دماهای بالاتر پایدار باشد. بنابراین، هر بار که تغییر شکلی در مواد حافظه دار ایجاد شود، با رساندن دمای آنها به مقدار مشخص، شکل اولیهٔ خود را باز می یا مراک طرحی از این تغییر ساختار پس از رسیدن به دمای موردنظر برای آلیاژهای حافظه دار را نشان می دهد.



بر اساس آنچه در شکل ۲۸ نشان داده شده است، یک آلیاژ حافظهدار دو ساختار بلوری متفاوت دارد که یکی در دمای بالا و دیگری در دمای پایین پایدار است؛ با این حال، قرار گرفتن در هر یک از این دو ساختار موجب تغییر شکل ظاهری (فنر جمعشده) آلیاژ حافظهدار نمیشود. اگر این ماده با اعمال نیروی مکانیکی تغییر شکل یابد (فنر کشیده شده)، ساختار پایدار دما پایین دچار تغییر اساسی میشود. با افزایش دما و با یک استحالهٔ فازی، چیدمان اتمها به حالت چیدمان دما بالا تغییر می کند و شکل اولیه بازیابی میشود (فنر جمع میشود). درنهایت، با کاهش دما، بدون اینکه شکل ظاهری تغییر کند، چیدمان اتمها به حالت پایدار در دمای پایین تغییر می یابد. این چرخهٔ تغییر شکل و بازیابی میتواند به دفعات صورت گیرد. در بسپارهای حافظهدار نیز چنین فرایندی رخ می دهد؛ با این تفاوت که بازآرایی رشتههای بسپار در دماهای مختلف ایجاد می شود.

#### 🔸 مواد پيزوالکتريک

بیزوالکتریکها دومین گروه معروف از مواد هوشمند به شمار میروند. نخستینبار اثر پیزوالکتریک در سال ۱۸۸۰ میلادی کشف شد. لغت پیزو ریشهٔ یونانی دارد و به معنای فشار است. عبارت پیزوالکتریک به پدیدهای اشاره دارد که طی آن در اثر اعمال فشار یا نیرو به یک مادهٔ جامد، تقارن بار الکتریکی در ساختار آن به هم میخورد و پتانسیلی الکتریکی در محیط جامد ایجاد میشود که میتواند به جریان الکتریکی منجر گردد. نکتهٔ مهم این است که این خاصیت حالت معکوس هم دارد؛ به این معنی که یک مادهٔ پیزوالکتریک در اثر اعمال اختلاف پتانسیل دچار تغییر شکل میشود؛ البته این تغییر اندازه در ابعاد بسیار کوچک اتفاق میافتد و کاربرد آن در مواردی است که به حرکات بسیار ظریف و کنترلشدهای نیاز باشد. حالت اول را اثر پیزوالکتریک مسقیم و حالت دوم را پیزوالکتریک معکوس<sup>۲</sup> مینامند (شکل ۲۹).

1- Piezoelectric

2- Converse piezoelectric



بلور کوارتز<sup>(</sup> شناختهشدهترین مادهٔ پیزوالکتریک طبیعی است. این بلور، که پرکاربردترین مادهٔ پیزوالکتریک مصنوعی محسوب میشود، ترکیبی از سرب، زیرکونیم و تیتانیوم (PZT)<sup>7</sup> با فرمول شیمیایی Pb[Zr<sub>x</sub>Ti<sub>1-x</sub>]O<sub>3</sub> است و مقدار x بین صفر و یک است. در میان نانومواد نیز، نانوساختارهایی چون نانومیلههای اکسید روی (ZnO) و باریم تیتانات (BaTiO<sub>3</sub>)<sup>7</sup> دارای ویژگی پیزوالکتریک هستند. مواد پیزوالکتریک کاربردهای متنوعی دارند؛ ازجمله در ساخت انواع حسگرها، نوسانگرها، مولدهای امواج فراصوت<sup>1</sup>، ساخت ادوات میکرو و نانو الکترومکانیکی (MEMS و NEMS)<sup>6</sup> و همچنین، ادوات صوتی، همچون میکروفون و گوشی کاربرد دارند.

## 🔸 مواد هوشمند رنگی

مواد هوشمند رنگی<sup><sup>3</sup> گروهی از مواد هوشمندند که پاسخشان به تغییرات محیط، تغییر رنگ است. این مواد با توجه به عامل محرک محیطی، که موجب تغییر رنگ میشود، به گروههای مختلف تقسیم میشوند. جدول ۱ این دستهبندی را نشان میدهد. بخش اول نام هر گروه بیانگر نوع محرک است و قسمت دوم، کلمهٔ کرومیک به معنی رنگی است که نوع پاسخ (تغییر رنگ) را نشان میدهد. شکل ۳۰ مثالهایی از کاربرد این دسته از مواد هوشمند را نشان میدهد. از آنجاکه مواد هوشمند رنگی با تغییر رنگ نسبت به عامل محرک واکنش نشان میدهند، کاربردهای متنوعی به عنوان حسگرها دارند. اعلان هشدار بیواسطه و بدون نیاز به تفسیر مهمترین مزیت چنین حسگرهایی است.</sup>

جدول ۱ : نمونههایی از انواع مواد هوشمند رنگی			
عامل محرک تغییر رنگ	نوع مادهٔ هوشمند رنگی		
دما	ترموکرومیک (Thermochromic)		
نور	فوتوکرومیک (Photochromic)		
مادهٔ شیمیایی (مثلا در pH های مختلف)	کموکرومیک (Chemochromic)		
فشار	پیزوکرومیک (Piezochromic)		
ميدان الكتريكي	الکتروکرومیک (Electrochromic)		

1- Quartz

- 2- Lead zirconate titanate
- 3- Barium titanate
- 4- Ultrasound
- 5- Micro/Nano electro mechanical system
- 6- Chromic smart material

کاربردهای فناوری نانو

وتساله مسرك



شکل ۳۰: مثالهای از کاربرد مواد هوشمند رنگی. (آ) مادهٔ کموکرومیک که نشت یک مادهٔ شیمیایی را با تغییر رنگ خود نشان میدهد، (ب) پنجرمهایی از جنس مواد الکتروکرومیک که شفافیت آنها با تنظیم پتانسیل اعمالی قابل تغییر است، (پ) مواد پیزوکرومیک که رنگشان با فشار مکانیکی تغییر می کند، (ت) شیشههای فوتوکرومیک که در برابر نور خورشید مات می شوند و (ث) لیوآنهایی پوشش دادهشده با مواد ترموکرومیک که با پرشدن از مایع داغ، سطح مایع را با تغییر رنگ نشان می دهند

#### 🛧 مواد هوشمند مغناطيسی

مواد پاسخدهنده به اعمال میدان مغناطیسی گروهی دیگر از مواد هوشمندند که وقتی در برابر یک میدان مغناطیسی قرار می گیرند، شکل خود را تغییر می دهند. این اثر تقریباً، مشابه اثر مواد پیزوالکتریک است؛ با این تفاوت که تحت تأثیر اعمال نیروی خارجی میدان توازن مغناطیسی ماده به هم می خورد. مواد مغناطیسی از حوزه های مغناطیسی با جهت گیری های مختلف تشکیل شدهاند. اگر این مواد در یک میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرند، حوزه ها شروع به هم جهت شدن با میدان خارجی می کنند. این امر سبب تغییر جزئی اندازهٔ این مواد می شود. همچنین، وقتی با اعمال نیروی مکانیکی مواد مغناطیسی می شده اند. این امر سبب تغییر می اندازهٔ این مواد می شود. همچنین، وقتی با اعمال مغناطیسی ماده نیز در برابر این فشار تغییر می کند. می توان چنین تغییرات مغناطیسی و اندازهٔ مواد هوشمند مغناطیسی را آشکارسازی و اندازه گیری کرد. این امر موجب کاربرد آنها به عنوان حسگر یا عمل گر مغناطیسی – مکانیکی می شود.

#### 🛧 مواد خودترميم شونده

مواد خودترمیمشونده<sup><sup>۱</sup> آخرین مورد از مواد هوشمندند. این گروه موادی هستد که برخی از پژوهشگران آنها را در دستهٔ مواد هوشمند قرار میدهند و یک ویژگی مهم و برجسته دارند که آنها را از بسیاری از مواد متداول شناختهشده متمایز میکند؛ مواد خودترمیمشونده، همان طور که از نامشان پیداست، میتوانند آسیبهایی را که به آنها وارد شده است ترمیم کنند. چنین موادی نویدبخش نسل نوینی از مواد کاربردی است؛ موادی که عمر بسیار طولانی دارند و نیازمند نگهداری و تعمیرات چندانی نیستند.</sup>

بهینهترین راه تعمیر یک قطعهٔ آسیبدیده، فرایندی است که با سرعت و دقت و بدون نیاز به خارج کردن قطعه صورت گیرد. ترمیم آسیب در مراحل اولیهٔ آن عاملی بسیار مهم در جلوگیری از آسیب و فرسودگی قطعات است. این در شرایطی است که امکان تعمیر قطعهٔ آسیب دیده وجود داشته باشد؛ زیرا موارد بسیاری وجود دارند که تعمیر قطعهٔ معیوب امکانپذیر نیست. چنین مواردی نشاندهندهٔ اهمیت بسیار زیاد مواد خودترمیمشونده است. مواد خودترمیمشونده این توانایی را دارند که با واردشدن اولین آسیب ساختاری و در مراحل آغازین، از پیشرفت بیشتر آسیب جلوگیری و خود را ترمیم کنند.



درحال حاضر، پژوهشهای بسیاری برای طراحی و توسعهٔ مواد هوشمند صورت می گیرد. در این میان، فناوری نانو نیز کمک بسیاری در این زمینه کرده است. انواع بسپارها و بتنهای خودترمیمشونده مثالهای عملی از این مواد هستند. آنها درواقع، مواد مرکبیاند که مواد ترمیمکنندهٔ خود را دارند. در یکی از طراحیهای مواد خودترمیمشونده، این مواد علاوه بر مواد متداولی که باید در ساختار خود داشته باشند، دربردارندهٔ کپسولهای نانوساختاری بودند که آغاز آسیب بود (شکل ۳۱). در صورت ایجاد و رشد ترکهای ترمیمکننده هم آسیب می بیند و محتوای آنها آزاد می شود. مواد دیگری در زمینهٔ مادهٔ خودترمیمشونده وجود دارد که آغاز گر واکنشهایی شیمیایی است و موجب می شود مادهٔ ترمیمکننده تغییر ماهیت دهد و ترک را ترمیم کند.

شکل ۳۲ تصویری از نانوکپسولهای حاوی مواد ترمیمکننده را نشان میدهد که برای ساخت مواد هوشمند خودترمیمشونده استفاده میشوند. شکل ۳۳ نیز تصویری از یک نمونهٔ بسپار خودترمیمشونده و روند ترمیم شکاف روی آن را نشان میدهد.



شکل ۳۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی (آ) روبشی و (ب) عبوری از نانو کیسول های حاوی مواد ترمیم کنندهٔ استفادهشده برای ساخت خودترمیم شونده [۳۹]



شکل ۳۳: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از (آ) شکاف ایجادشده و (ب) شکاف ترمیم شده بر روی بسپار خودتر میم شونده [۴۰]

# گتتال سرزم کاربردهای فناوری نانو

回 فناوري نانو و مواد هوشمند

بر اساس آنچه تا کنون بیان شد، خواصی مواد هوشمند ماهیت ذاتی آنهاست؛ ازاینرو، در حالت کلی و با صرفنظر کردن از مواردی مانند بتنهای خودترمیمشونده، میتوان گفت که این خواص بهطورمستقیم هوشمند ایجاد کند. فناوری نانو توانایی ساخت مواد و ادوات با کنترل ریزساختار در ابعاد اتمی و مولکولی را دارد، که میتواند کمک بسیاری به بهبود خواص چنین موادی کند. همچنین، خواص منحصربهفرد مواد هوشمند موجب میشود تا فناوری نانو ابزار و مواد اولیهٔ بسیار کارآمدی برای ساخت ادوات و سامانههای هوشمند با چندین کارایی داشته باشد. بنابراین، ارتباط میان فناوری نانو و مواد هوشمند ارتباطی دوات و سامانههای هوشمند با چندین کارایی داشته باشد. بنابراین، ارتباط میان فناوری نانو و مواد هوشمند ارتباطی دوطرفه و مکمل است. این ام موجب میگردد مواد هوشمند جدیدی ساخته شوند که بتوانند در مقایسه با مواد قدیمی تر، که رفتاری ساده در برابر تغییرات محیطی نشان میدادند، فعالانه تر به محیط خود پاسخ دهند. این نانومواد در ساختارهایی چون نانوحسگرها، تغییرات محیطی نشان میدادند، فعالانه تر به محیط خود پاسخ دهند. این نانومواد در ساختارهایی چون نانوحسگرها، نور یانورایانهها و نانوماشین ها کاربرد فراوانی خواهند داشت. ترکیب فناوری نانو و مواد هوشمند موجب شده ای حازم در مانوری نانو در مواد و یژگیهای بهبودیافته و کاربردهای فراوانی دارند و میتواناند پاسخ مناسبی به نیازهای بشر بدهند. این مواد و یژگیهای بهبودیافته و کاربردهای فراوانی دارند و میتوانند پاسخ مناسبی به نیازهای بشر بدهند.

نمونهای از نانومواد هوشمند که میتوانند تغییرات بزرگ و چشمگیر در کیفیت زندگی انسان ایجاد کنند عبارتاند از: ۲۰۰۰ میتواند میتوانند تغییرات بزرگ و چشمگیر در کیفیت زندگی انسان ایجاد کنند عبارتاند از:

- مواد هوشمندی که آسیبهای واردشده به بدن را تشخیص میدهند و با آزادسازی داروها و آنتیبیوتیکها از جان انسان محافظت میکنند.
- لباسهای هوشمندی که با تشخیص نوع ضربه و جهت آن، در برابر ضربه مقاومت و از انسان محافظت میکنند.

اندامهای مصنوعی که پس از قرار گرفتن در بدن انسان، با توجه به شرایط بدن بیمار، خود را تغییر میدهند تا بیشترین سازگاری را داشته باشند.

- المانههای تولید، تبدیل و ذخیرهٔ انرژی کارآمدتر باتریهای نسل جدید.
- 🕸 مواد هوشمند زیستی برای تشخیص زودهنگام بیماری و آزادسازی داروی مناسب در محل مورد نیاز.
  - کی منسوجات هوشمند با قابلیت تغییر رنگ برای نشاندادن یک وضعیت مشخص در محیط پیرامون.

باید توجه کرد که بسیاری از موارد ذکرشده در مرحلهٔ طراحی، تحقیق و توسعه هستند و راهی طولانی تا عملی شدن در پیش دارند.



نانومواد

نویسندگان همکار در این فصل: فائزه ابراهیمیان غازانی علی انصا*ر*ی

🗞 مقدمه:

مطالعه و بررسی خواص مواد یکی از ضروری ترین اقداماتی است که امکان شناخت دقیق آنها را فراهم می کند. مطالعهٔ خواص ماده با ایجاد شناختی دقیق از ماهیت آن، مسیر توسعهٔ مواد پیشرفته با بهره گیری از خواص ذاتی آن ماده برای کاربردهای مختلف را هموار می کند. روش های متنوعی برای مطالعهٔ خواص فیزیکی و شیمیایی مواد مختلف وجود دارد که به نوع خاصیتی که بایستی مطالعه شوند بستگی دارد. بنابراین، می توان گفت که تقریباً به تعداد خاصیت های مواد مختلف، روش های مشخصهیابی برای مواد وجود دارد. با این حال یکی از مهم ترین روش های مطالعهٔ خواص مواد، مشاهدهٔ آنها برای آگاهی از ساختار درونی و چیدمان اتمهای ماده یا در اصطلاح، ریز ساختار <sup>۱</sup> ماده است.

مطالعهٔ ریزساختار مواد در مقیاس نانو از اهمیت فراوانی برخوردار است؛ زیرا با تغییر جزئی در مقدار ماده، شکل و هندسهٔ ماده، ترکیب شیمیایی و درنهایت، چیدمان اتمی یا مولکولی آن در ابعاد نانو خواص به میزان چشم گیری تغییر میکند. بنابراین، باید از شکل، هندسه و چیدمان اتمی نانومواد اطلاعات دقیقی داشته باشیم. این اطلاعات به شناخت بهتر خواص نانومواد منجر میشود. در میان انواع روشهای مطالعهٔ خواص مواد، روشهای تصویربرداری و مطالعهٔ ساختاری اهمیت بسیاری در بررسی نانومواد دارد. در این فصل روشهای اصلی تصویربرداری از نانومواد و مطالعهٔ ساختار بلوری آنها معرفی خواهد شد.

# 🗞 تصویربرداری از مواد

وقتی از تصویربرداری سخن می گوییم، آنچه به ذهن خطور می کند ثبت لحظات با استفاده از دوربین عکاسی یا فیلمبرداری است. در چنین مواردی معمولاً، هدف دوربینها نماهای وسیع طبیعت و یا اجسامی است که بهراحتی می توان آنها را مشاهده کرد. در حالی که در تصویربرداری از مواد، به ویژه نانومواد، اولین و مهم ترین هدف دیدن ساختار ماده در ابعاد کوچک است. بنابراین، در تصویربرداری از مواد، نیاز به بزر گنمایی (M)<sup>۲</sup> است تا بتوان تصویری واضح و با جزئیات کامل از ماده داشت. بزر گنمایی به شکل زیر تعریف می شود:

(1)



برای مثال، اگر با دوربین عکاسیای که توانایی بزرگنمایی نوری دارد از یک مورچه، که طول واقعی آن ۱۰ ۱۰ است، تصویری تهیه کنیم که در آن طول مورچه ۱۰ فرض کنید از نانوذرات طلا، که اندازهای برابر ۱۳۵ ۵ دارند، تصویری تهیه کردهایم. اگر طول نانوذرات در تصویر ۱۰ ۱ باشد، بزرگنمایی تصویر ۲ میلیون خواهد بود. به عبارتی دیگر، تصویر تهیهشده اجسام را ۲ میلیون بار بزرگتر از اندازهٔ واقعیشان نشان می دهد (شکل ۱).

مطالعه ريزساختار نانومواد

1- Microstructure

2- Magnification

با توجه به محدودهٔ ابعادی تعریفشده برای فناوری نانو، واضح است که برای تصویربرداری از نانومواد و مشاهدهٔ آنها به استفاده از ابزارهایی نیاز داریم که توانایی بزرگنماییشان حداقل ۵۰ هزار برابر باشد. بر این اساس، امکان استفاده از ابزارهای تصویربرداری معمولی برای مشاهدهٔ ساختار نانومواد وجود ندارد.

ابزارهای تصویربرداری، که توانایی بزرگنمایی و ایجاد تصویر باکیفیت از مواد را دارند، میکروسکوپ<sup>۱</sup> نامیده میشوند. میکروسکوپ به وسیلهای گفته میشود که با استفاده از عدسیها<sup>۲</sup> تصویری واضح از اجسامی ارائه میدهد که با چشم قابلمشاهده نیستند. برایناساس، استفاده از یک عدسی دستی (ذرهبین) برای مشاهدهٔ اجسام کوچک، سادهترین فرایند میکروسکوپی است. نخستین میکروسکوپهای ساختهشده ترکیبی ساده از دو عدسی بودند که در دو انتهای یک لوله قرار داشتند. امروزه، از انواع میکروسکوپهای نوری، که از ترکیب چندین عدسی نوری شکل گرفتهاند، برای مشاهده مواد با بزرگنمایی حداکثر ۱۰۰۰ برابر استفاده میشود (شکل ۲). لغت میکروسکوپ از ترکیب دو لغت یونانی میکروس<sup>7</sup> به معنای کوچک و اسکوپین<sup>۶</sup> به معنای نگاهکردن تشکیل شده است.



شکل ۲: طرحی از ساختار یک میکروسکوپ نوری متداول و مسیر پر تو نور از منبع تا چشم ناظر [۴۲]

💿 محدودیتهای میکروسکوپهای نوری

میکروسکوپهای نوری با تاباندن نور به نمونهٔ موردمطالعه و با استفاده از نور بازتابی یا عبوری از آن، تصویری بزرگنمایی شده از نمونه ایجاد میکنند (شکل ۳). پیش از این، بیان شد که بیشترین بزرگنمایی با استفاده از یک میکروسکوپ نوری برابر ۱۰۰۰ است؛ با چنین بزرگنمایی در بهترین شرایط، میتوان از اجسامی به بزرگی یک میکرومتر تصویربرداری کرد. این در حالی است که برای مشاهدهٔ مواد در ابعاد نانو به بزرگنمایی حداقل ۵۰٬۰۰۰ نیاز داریم. این امر مهمترین محدودیت میکروسکوپهای نوری برای مطالعهٔ نانومواد محصوب می شود.

- 1- Microscope
- 2- Lens
- 3- Mikrós
- 4- Skopeîn
- ۹۷

مفاهيم اوليه فناوري نانو و كاربردهاي آن در فيزيك

مطالعه ريزساختار نانومواد

محسال چهارم



محدودیت بزرگنمایی میکروسکوپهای نوری به دلیل طولموجی است که نور مرئی دارد. نور مرئی ترکیبی از طول موجهای مختلف در محدودهٔ ۲۰۰ – ۲۰۰ است؛ براین اساس، بُعد مشخصهٔ بزرگترین نانومادهای که بخواهیم تصویری از آن تهیه کنیم، چهار بار کوچکتر از کوتاهترین پرتو نور مرئی (نور بنفش) خواهد بود. لازمهٔ ایجاد تصویر با پرتوهای نور مرئی این است که دستهای از پرتوهای نوری به شکل منظم از یک جسم به چشم ناظر برسند. پیشتر و در بررسی برهمکنشهای نور مرئی با نانوذرات، اشاره شد که یک ماده با ابعاد بسیار کوچک با پراکندهکردن نور اجازهٔ چنین بازتاب یا عبوری منظمی را نمیدهد. ازاینرو، برای بزرگنمایی هیچ پرتو نور منظمی از نانومواد به عدسیهای میکروسکوپ نمیرسد. میتوان بهعنوان یک قاعدهٔ گفت که لازمهٔ چنین انعکاس یا عبور منظمی این است که ابعاد جسم یک مرتبهٔ بزرگی ٰ بزرگتر از طولموج پرتوهای تاباندهشده به آن باشد. به همین دلیل است که با استفاده از میکروسکوپهای نوری کوچکترین اندازهای که میتوان دید حدود ۱ µm ۱ است که یک مرتبهٔ بزرگی بزرگتر از طول موج مرئی است (µm ۱ در برابر mm).

در کنار بزرگنمایی، دو مفهوم مهم دیگر هم وجود دارد که تعیین کنندهٔ کیفیت تصاویر تهیهشده توسط میکروسکوپ است. اولين مورد، عمق ميدان أنام دارد؛ عمق ميدان نشان دهندهٔ فاصله اي است كه جسم مي تواند نسبت به عدسي شیئی داشته باشد و تصویر واضحی از آن شکل بگیرد. هر چقدر که یک ابزار تصویربرداری عمق میدان بیشتری



داشته باشد، می تواند تصویر واضح تری از جزئيات غيرهمسطح جسم موردبررسي ارائه کند. شکل ۴ تصویری از پایههای اتصال یک پردازندهٔ مرکزی رایانه را در دو حالت عمق میدان دید کم و زیاد نشان مىدهد. عمق ميدان ديد بالا یکی از مهمترین مشخصههای یک ابزار

شکل ۴: تصویری از پایه های پردازندهٔ مرکزی رایانه در دو حالت عمق میدان دید (آ) کم و (ب) زیاد

۱- منظور از مرتبهٔ بزرگی (order of magnitude) اختلاف ۱۰ برابری یک کمیت است.

تصویربرداری علمی است؛ عمق میدان دید بالا اطلاعات کاملی از پستیوبلندیهای سطح نمونهٔ مورد مطالعه به ما میدهد و میتواند درک درستی از ساختار سهبعدی جسم ایجاد کند. یکی از مشکلات بزرگ میکروسکوپهای نوری عمق میدان دید پایین آنهاست. این میکروسکوپها معمولاً تصویری دوبعدی از جسم ارائه میدهند که امکان تشخیص پستیوبلندیهای سطح جسم یا ساختار سهبعدی آن را ناممکن میکند.



ـکل ۵: طرحی ساده از معهوم قدرت تفکیک؛ (۱) دو دره نفکیکنش و (ب) دو ذرهٔ تفکیکشده مشخصهٔ مهم دیگر ابزار تصویربرداری، مفهومی است موسوم به قدرت تفکیک.<sup>۱</sup> قدرت تفکیک، همان طور که از نام آن پیداست، نشاندهندهٔ تفکیک اجزای مختلف یک تصویر از یکدیگر است. تعریف قدرت تفکیک عبارت است از کمترین فاصلهای که دو جسم مجزا از یکدیگر دارند و ابزار تصویربرداری آنها را

بهصورت اجسام جدا از هم نشان میدهد. شکل ۵ در طرحی ساده، مفهوم قدرت تفکیک را نشان میدهد. سومین مشکل بزرگی که میکروسکوپهای نوری را از تصویربرداری نانومواد ناتوان میکند، قدرت تفکیک نامناسب آنهاست. بهترین قدرت تفکیک گزارششده برای میکروسکوپهای نوری حدود μm ۰/۲ است؛ این رقم دو بار بزرگتر از اندازهٔ تعریفشده برای نانومواد است. ناتوانی میکروسکوپهای نوری از رسیدن به تفکیک بهتر بهسبب تداخل پرتوهای نوری هنگام عبور از فواصل هممرتبه با طولموج آنهاست.

مشکلاتی که میکروسکوپهای نوری دارند ناشی از طول موج مرئی و ضعف عدسی هایی است که در آنها به کاررفته می شود. مشکل بزرگ نمایی و قدرت تفکیک را می توان با استفاده از پر توهایی با طول موج کوتاه تر حل کرد ولی امکان استفاده از پر توهای الکترومغناطیسی با طول موج کوتاه تر از نور مرئی برای تصویر برداری در عمل، ناممکن خواهد بود؛ زیرا این پر توها شامل پر توهای فرابنفش و ایکس<sup>۲</sup> هستند و به دلیل انرژی بالایی که دارند، یا با ماده وارد برهم کنش می شوند و جذب می گردند یا بدون برهم کنش با ماده از آن عبور می کنند و تصویری ایجاد نمی شود. مسئلهٔ دیگر این است عدسی های کارآمدی ساخته نشده اند که بتوانند به منظور ایجاد تصویر و بزرگ نمایی، پر توهایی پر انرژی را همگرا، واگرا یا متمرکز کنند. ساخته نشده اند که بتوانند به منظور ایجاد تصویر و بزرگ نمایی، پر توهایی پر انرژی را عدسی های معمولی، که از شیشه ساخته می شوند، بخش قابل توجهی از پر تو فرابنفش را جذب می کنند و به آن اجازهٔ عبور نمی دهند. هرچند با استفاده از کوار تز خالص می توان عدسی های شفاف به پر تو فرابنفش تهیه کرد، اما هزینهٔ بسیار زیادی در پی دارد و توجیه اقتصادی ندارد.

🖲 استغاده از پرتو الکترونے برای تصویربرداری از مواد

ناتوانی میکروسکوپهای نوری از دستیابی به بزرگنماییهای بالا و تمایل پژوهشگران برای یافتن راهی برای مشاهدهٔ کوچکترین اجزای تشکیلدهندهٔ ماده، سبب شده است که تلاشهای بسیاری برای ساخت میکروسکوپهای توانمندتر صورت گیرد. ساخت چنین میکروسکوپهایی با تکیه بر یافتههای فیزیکی دربارهٔ ماهیت دوگانهٔ ماده و رفتار موجی – ذرهای آن ممکن شده است. پیش از این، با مفهوم رفتار موجی – ذرهای الکترونها آشنا شدید. بر اساس آنچه دوبروی بیان کرد، الکترونها رفتار موجی از خود بروز میدهند و طول موجشان متناسب با سرعت حرکت آنهاست. چون الکترون یک ذرهٔ باردار است؛ در حین حرکت در یک میدان مغناطیسی به آن نیرویی وارد میشود که این نیرو بر راستای حرکت الکترون عمود است.

مفاهيم اوليه فناوري نانو و كاربردهاي آن در فيزيك

واقعیتهای جدید دربارهٔ رفتار دوگانهٔ الکترون پژوهشگران را در سال ۱۹۳۲ میلادی، به این باور رساند که میتوان با تاباندن پرتوی از الکترونهای همگراشده توسط میدان مغناطیسی به یک ماده، تصاویری به دست آورد که بزرگنمایی و قدرت تفکیک بیشتری از میکروسکوپهای نوری داشته باشند. مهمترین نکته این است که طولموج الکترون بسیار کوچکتر از طولموج نور مرئی است. این امر موجب شد که پژوهشگران دانشگاه فنی برلین<sup>1</sup> در پاییز ۱۹۳۳ با استفاده از پرتو پرانرژی الکترون، موفق شوند تصویری از الیاف پنبه با بزرگنمایی بیشتر از بزرگنمایی میکروسکوپهای نوری ثبت کنند. این دستاورد آغاز گر نسل جدیدی از میکروسکوپها شد که از پرتو الکترونی<sup>۲</sup> برای ایجاد تصویر استفاده میکنند و با نام میکروسکوپهای الکترونی (EM)

امروزه، با پیشرفتهای صورت گرفته در طراحی و ساخت انواع میکروسکوپهای الکترونی، امکان دستیابی به بزرگنمایی از مرتبهٔ میلیون برابر وجود دارد و قدرت تفکیک میکروسکوپها به کمتر از nm ۱ رسیده است. علاوه بر این، برخی میکروسکوپهای الکترونی، با داشتن عمق میدان بالا، میتوانند بهراحتی از پستیوبلندیهای سطح ماده تصویربرداری کنند و شکل سهبعدی ماده را به نمایش بگذارند. شکل (۶- آ و ب) دو تصویر از فسیلی موسوم به رادیولاریا نشان میدهد که با استفاده از دو نوع میکروسکوپ نوری و الکترونی تهیه شده است. این شکل بهخوبی نشاندهندهٔ تفاوت کیفیت تصویر ایجادشده با میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی است. همچنین، تصاویر مشابهی از یک زنبورعسل نشاندهندهٔ تفاوت کارکرد دو نوع میکروسکوپ الکترونی و نوری است.



شکل ۶: تصویری از فسیل رادیولاریا تهیهشده با میکروسکوپ (آ) نوری و (ب) الکترونی [۴۴] و تصویری از سر زنیورعسل تهیهشده با میکروسکوپ (پ) نوری و (ت) الکترونی [۴۲]

# 🗞 🛛 مبانی تصویربرداری با استفاده از پرتو الکترونی

تصویربرداری با استفاده از پرتو الکترونی ابزار بسیار قدرتمندی در اختیار پژوهشگران مختلف قرار داده است تا بتوانند دنیای مواد در ابعاد بسیار کوچک را نظاره کنند. ایجاد پرتو الکترونی با طولموج مناسب و متمرکزکردن آن، دو مرحلهٔ مهم در فرایندهای میکروسکوپی الکترونیاند. در ادامه، الزامات و نحوهٔ ایجاد پرتو الکترونی، نحوهٔ متمرکزکردن پرتو الکترونی و نوع برهمکنش این پرتو بیان میشود.

<sup>1-</sup> Technical University of Berlin

<sup>2-</sup> Electron beam

<sup>3-</sup> Electron microscopy

<sup>4-</sup> Radiolaria

💿 محفظه خلاء

پرتو الکترونی، که برای تصویربرداری با میکروسکوپهای الکترونی مورداستفاده قرار میگیرد، از تعداد زیادی الکترون تشکیل شده است. الکترونها بهراحتی با هر مادهای که در مسیرشان باشد برهمکنش میکنند. این برهمکنشها موجب میشود که در صورت وجود هر مادهای در مسیر باریکهٔ الکترونی<sup>۱</sup>، این باریکه پیش از رسیدن به سطح نمونهٔ موردمطالعه، ضعیف شود و از بین برود. به بیان دیگر، هر نوع محیط مادی برای پرتو الکترونی غیرشفاف است. ازاینرو، نیاز است تا برای رسیدن پرتو الکترونی به سطح نمونهٔ موردمطالعه مسیری خالی از هر نوع ماده فراهم گردد. چنین شرایطی دراصطلاح، خلاء<sup>۲</sup> نامیده میشود.

بر این اساس، تصویربرداری الکترونی باید درون محفظهای صورت گیرد که بهطور پیوسته تخلیه میشود؛ این محفظه را محفظهٔ خلاء<sup>۲</sup> مینامند. محفظهٔ خلاء این امکان را فراهم میآورد که پرتو الکترونی از لحظهٔ ایجاد و تاباندهشدن به سطح نمونه تا لحظهای که از الکترونها برای ایجاد تصویر استفاده میشود، با مادهای غیر از نمونهٔ موردمطالعه برهمکنش نداشته باشد. علاوه بر جلوگیری از تضعیف و پراکندهشدن پرتو الکترونی، جلوگیری از آسیب دیدن مولد پرتو الکترونی و نیز، ممانعت از واکنش شیمیایی مولکولهای هوا و نمونهای که تحت تابش پرتو الکترونی قرار دارد، دو دلیل دیگری است که تصویربرداری الکترونی را به شرایط خلاء نیازمند میکند.

برای ایجاد خلاء نیاز است که هوای درون محفظه بهطور کامل تخلیه شود. این فرایند با استفاده از تجهیزاتی که به پمپ خلاء<sup>4</sup> مشهورند، صورت می گیرد. برای درک عملکرد سامانهٔ خلاء کافی است به جاروبرقی که در خانه دارید نگاه کنید؛ درون جاروبرقی یک پمپ خلاء وجود دارد که هنگام کار، مکش قوی ایجاد می کند و در اثر آن گرد و خاک و زبالهها به درون کیسهٔ جاروبرقی کشیده می شوند. حال اگر لولهٔ جاروبرقی را به یک ظرف بسته (مانند بطری شیسهای) وصل کنید، با روشن شدن جاروبرقی بخشی از هوای درون ظرف تخلیه می گردد و فشار هوای درون ظرف کمتر از فشار هوای بیرون می شود. در این شرایط، این ظرف دارای خلاء خواهد بود.

میزان خلاء موجود در یک محفظه، را برحسب فشار مطلق<sup>\*</sup> گازهای درون آن بیان میکنند. به دلیل خلاء ایجاد شده فشار درون محفظه بسیار پایین است؛ بنابراین، از واحدهایی برای بیان فشار محفظههای خلاء استفاده میشود که یکاهای کوچکی دارند. بهطورمعمول، از واحد تور<sup><sup>6</sup></sup> برای چنین هدفی استفاده میشود؛ یک تور برابر .<u>۰</u><sup>۲</sup> فشار هوا در سطح دریای آزاد و برابر ۷۶۰ میلیمتر جیوه یا یک اتمسفر است. خلاء موردنیاز برای میکروسکوپهای الکترونی بسته به نوع آنها متفاوت است و در بازهٔ Torr <sup>۵</sup> - ۱۰<sup>-۱۱</sup> تغییر میکند. برای ایجاد چنین خلائی به چندین مرحله مکش و استفاده از پمپهای خلاء متنوع نیاز داریم. معمولاً، در میکروسکوپهای الکترونی از سه نوع پمپ چرخشی<sup>3</sup> (کمترین خلاء)، نفوذی<sup>۲</sup> (خلاء متوسط) و توربو مولکولی<sup>۸</sup> (بیشترین خلاء) استفاده میشود. نکتهای که باید به آن توجه کرد این است که وقتی برای بیان میزان خلاء از اصطلاح خلاء زیاد استفاده میشود، به معنای کاهش هرچه بیشتر فشار درون محفظه است؛ ازاینرو، خلاء زیاد مترادف با فشار مطلق کم است.

برای ایجاد خلاء، پمپها بهصورت سری نصب میشوند؛ بهاینترتیب که پمپ تولیدکنندهٔ بیشترین خلاء بهطورمستقیم به محفظهٔ خلاء وصل میشود و خروجی آن به ورودی یا دهانهٔ مکش پمپ متوسط و درنهایت، خروجی پمپ خلاء

- 2- Vacuum
- 3- Vacuum chamber
- 4- Vacuum pump
- 5- Torr
- 6- Rotary pump
- 7- Diffusion pump
- 8- Turbomolecular pump

مطالعه ريزساختار نانومواد

محيال جراره

<sup>1-</sup> Electron beam

متوسط به دهانهٔ مکش پمپ خلاء چرخشی، که کمترین خلاء را ایجاد می کند، وصل می شود. در شرایطی که از سه نوع پمپ استفاده می شود، هنگام آغاز کار و ایجاد خلاء، ابتدا پمپ چرخشی شروع به کار می کند و هوای موجود در مسیر تخلیه و محفظه را تا حد توان خود خارج می کند. با رسیدن به حداکثر خلائی که پمپ چرخشی می تواند ایجاد کند، پمپ خلاء متوسط (پمپ نفوذی) آغاز به کار می کند و فشار محفظه و مسیر تخلیه تا خروجی پمپ توربو را کاهش می دهد. درنهایت، پمپ خلاء توربو کار خود را شروع می کند و بیشترین خلاء ممکن را درون محفظه ایجاد می کند. لازم به ذکر است که برای نگهداشتن شرایط مناسب خلاء درون محفظه پس از دستیابی به آن، تمام پمپهای خلاء باید به طور همزمان کار کنند. انتخاب تعداد و نوع پمپها به نوع میکروسکوپ الکترونی و خلائی که درون محفظهٔ خلاء نیاز است بستگی دارد.

回 ایجاد پرتو الکترونے

شدت و کیفیت پرتو الکترونی یکی از تعیین کننده ترین عوامل کیفیت تصویر نهایی به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی است. مولد پرتو الکترونی در میکروسکوپهای الکترونی را دراصطلاح، تفنگ الکترونی مینامند. دو فرایند اصلی برای ایجاد پرتو الکترونی وجود دارد: نشر حرارتی و نشر میدانی.<sup>۲</sup> پرتو الکترونی پس از تولید، در یک میدان الکتریکی قوی، که بزرگی آن از مرتبهٔ کیلوولت (kV) است، شتاب میگیرد. این امر موجب می شود که اندازهٔ حرکت الکترونها افزایش یابد و براساس رابطهٔ دوبروی (رابطهٔ ۵)، طول موج آن کم شود. مهم ترین جزء تفنگ الکترونی، که الکترونها از آن گسیل می شوند، کاتد است. در برخی موارد، به کاتد رشته یا فیلمان<sup>۴</sup> هم گفته می شود (شکل ۷).



کاتد رشتهای بدون در پوش [۴۲]

در پدیدهٔ نشر حرارتی الکترون، همانطور که از نام آن پیداست، گرم کردن کاتد منجر به نشر الکترون میشود. در این تفنگها، کاتد تحتتأثیر عبور جریان الکتریکی به حدی گرم میشود که الکترونهای اتمهای آن انرژی کافی برای غلبه بر تابع کار<sup>6</sup> و عنصر تشکیل دهندهٔ کاتد را به دست می آورند و میتوانند از دام هستهٔ اتم آزاد و وارد فضای خلاء شوند. در تفنگهای نشر حرارتی، بر روی کاتد درپوشی موسوم به درپوش ونلت<sup>6</sup> قرار داده می شود که که روزنهٔ کوچکی در مرکز دارد. وظیفهٔ این درپوش متمرکز کردن و کاهش قطر پرتو الکترونی است. با توجه به

- 2- Thermoionic emission
- 3- Field emission
- 4- Filament

می گردد.

مطالعه ريزساختار نانومواد

<sup>1-</sup> Electron gun

۵- تابع کار (work function) به حداقل کار لازم برای جدا کردن یک الکترون از قید جاذبهٔ هستهٔ اتم جامد گفته میشود و برحسب واحد الکترونولد (eV) بیان

اینکه تفنگهای الکترونی نشر حرارتی تا دمای بالایی گرم میشوند، کاتد آنها باید از موادی ساخته شود که دمای ذوب بالا و تابع کار پایینی داشته باشند. رشتههایی از جنس تنگستن (W) با دمای ذوبی حدود °C ۳۴۰۰ و تابع کاری برابر ۷۵ ۴/۵ سادهترین و ارزانترین کاتدی است که در تفنگهای الکترونی نشر حرارتی استفاده میشود. همچنین، در تفنگهای الکترونی نشر میدانی از ترکیب دیگری به نام لانتانیوم هگزابوراید (LaB<sub>6</sub>) با تابع کار ۷۳ °/۰ نیز استفاده میشود. بلور



(شکل ۸) به دلیل تابع کار پایینتر از تنگستن، عمر کاری بیشتری نسبت به آن دارد و از دمای کاری پایینتری برخوردار است.

پدیدهٔ نشر میدانی ماهیتی متفاوت از نشر حرارتی دارد. گسیل الکترون در نشر میدانی براساس پدیدهای کوانتومی، موسوم به تونلزنی الکترونی صورت میگیرد. دربارهٔ این پدیده در بخش تونلزنی کوانتومی و جریان الکتریکی تونلی بیشتر صحبت خواهیم کرد. در تفنگهای نشر میدانی، کاتد بسیار نوکتیز ساخته میشود؛ بهنحوی که امکان مشاهدهٔ آن با چشم ممکن نیست. نوکتیز بودن کاتد موجب میشود که چگالی بار الکتریکی در نوک آن بسیار بالا باشد. تجمع

(Ĩ)

الکترونها در نوک کاتد موجب میگردد که با اعمال میدان الکتریکی مناسب به کاتد، الکترونها بهراحتی وارد خلاء شوند. درصورتیکه میدان الکتریکی قوی بر روی کاتد نوکتیز اعمال شود، این کاتد شروع به نشر پرتو الکترونی میکند. مهمترین مزیت پدیدهٔ نشر میدانی این است که برای گسیل الکترون به افزایش دما نیاز ندارد؛ ازاینرو کاتد این نوع تفنگهای الکترونی طول عمر بسیار بالایی دارد. تفنگهای الکترونی نشر میدانی برای کار به خلاء بسیار بالایی نیاز دارند. کاتد تنگستنی که بسیار نوکتیز ساخته میشوند، معمول ترین کاتد مورداستفاده در تفنگهای نشر میدانی هستند.



(پ)

شکل ۹: طرحی ساده و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده

از انواع کاتدهای (آ) نشر حرارتی – رشتهٔ تنگستن، (ب) نشر حرارتی –

جدول ۱: مقایسهٔ سه نوع تفنگ الکترونی معرفیشده				
تنگستن نوکتيز	LaB <sub>6</sub>	رشتهٔ تنگستن	نوع تفنگ	
نشر میدانی	نشر حرارتی	نشر حرارتی	پديدة انتشار	
۳ – ۱۰	1 – ۲	۲۰۰۰۰ – ۵۰۰۰۰	قطر پرتو (nm)	
111	<i>۱</i> • <sup>-۲</sup>	۱ • -۵	خلاء موردنياز (Torr)	
دمای محیط	14	۲۵۰۰	دمای کاری ( <sup>C</sup> °)	
بیش از ۱۰۰	1.	١	قیمت نسبی	
حدود ۵۰۰۰	۵۰۰ – ۱۰۰۰	۵۰ – ۱۰۰	عمر مفيد (ساعت)	

بلافاصله بعد از تفنگ الکترونی، یک آند قرار دارد که وظیفهٔ آن شتابدادن به الکترونهاست. میان آند و کاتد تفنگ الکترونی اختلاف پتانسیلی از مرتبهٔ کیلوولت وجود دارد. آند، که دارای بار الکتریکی مخالف با بار پرتو الکترونی است، پرتو الکترونی گسیلشده از تفنگ الکترونی را بهشدت به سمت خود جذب می کند. شتابگیری الکترونها سبب افزایش اندازهٔ حرکت (تکانه) آنها میشود و درنتیجه، طول موج آنها را کاهش میدهد. بخش زیادی از الکترونهای شتاب گرفته، که در راستای عمود بر سطح آند قرار دارند، از حفرهای واقع در مرکز آند عبور می کنند؛ درحالی که الکترونهایی که انرژی جنبشی کمتری دارند یا دارای زاویهٔ حرکتی هستند، توسط آند جذب میشوند (شکل ۱۰). این فرایند کیفیت باریکهٔ الکترونی تولیدشده را افزایش می دهد. جدول ۲ نتایج حاصل از محاسبهٔ طول موج دوبروی الکترون در اثر شتاب گرفتن در میدانهای الکتریکی مختلف را نشان می دهد. یکای طول موج دوبروی الکترونها در جدول ۲ برحسب



شکل ۱۰: چیدمان اجزای تعنک الکترونی و اند شتابدهنده در یک میکروسکوپ الکترونی [۴۲]

بسیار کوچکتر از اندازهٔ اتمها، که بیش از mn ۵۰ pm است، میباشد. این امر موجب میشود که بتوانیم با استفاده از پرتو الکترونی تصویرهایی با بزرگنمایی بسیار زیاد و در برخی موارد، با وضوح اتمی تهیه کنیم.

جدول۲ : طولموج الکترون در اثر شتاب گرفتن در میدانهای الکتریکی مختلف			
طولموج دوبروی (pm)	سرعت حرکت (s/m)	اختلاف پتانسیل (kV)	
۱۲/۲	۰/۵۸	۱.	
۵/۳۶	١/٢۴	۵۰	
٣/٧٠	1/84	۱۰۰	
۲/۵۱	۲/•۸	۲۰۰	
١/٩٧	۲/۳۳	۳۰۰	
1/84	۲/۴۸	4	
•/AY	۲/۸۲	1	

فتعال چہارم مطالعہ ریزساختار نانومواد

۱- یک پیکومتر (picometer) برابر ۱۰<sup>-۱۲</sup> متر یا به عبارتی ۰/۰۰۱ nm

10F

امروزه در انواع میکروسکوچهای الکترونی حداکثر از اختلاف پتانسیلی حدود kV ۴۰۰ برای شتاب الکترون است. استفاده می شود. با این حال در جدول ۲ طول موج الکترون تا اختلاف پتانسیل برابر ۱۰۰۰ kV هم آورده شده است. مشاهده می کنید که سرعت حرکت الکترون ها در اثر شتاب در میدان الکتریکی قوی بسیار به سرعت حرکت نور (۳/۳ ما × ۱۰<sup>6</sup> m/s) نزدیک می شود.

## 🖲 همگرا کردن و هدایت پرتو الکترونے

پس از تولید پرتو الکترونی، این پرتو باید همگرا شوند و به سمت نمونهٔ مورد مطالعه هدایت گردند؛ مشابه آنچه در شکل ۳ برای نور مرئی نشان داده شد. میدانید که به یک ذرهٔ باردار در حال عبور از میدان مغناطیسی نیرویی وارد می شود که بر راستای حرکت ذره عمود است.\* این نوع برهم کنش از طریق اعمال یک میدان مغناطیسی کنترل شده امکان تغییر مسیر حرکت الکترونها را به صورت بسیار دقیق فراهم می کند. این امر مبنای ساخت تجهیزاتی است که برای همگرا کردن یا تغییر مسیر حرکت پرتو الکترونی مورداستفاده قرار می گیرند و با نام عدسی مغناطیسی<sup>۱</sup> شناخته می شوند.

(Ĩ)

عدسیهای الکترومغناطیسی بهکاررفته در میکروسکوپهای الکترونی در واقع، آهنرباهای الکتریکی دایرهای هستند که سیمپیچهای بسیار دقیق و باکیفیت دارند. با کنترل جریان الکتریکی عبوری از این سیمپیچها، میدان مغناطیسی ایجادشده بهراحتی کنترل میشود. هنگام عبور پرتو الکترونی از میان عدسیهای مغناطیسی، میدان مغناطیسی اعمالشده آنها را به مقدار موردنیاز همگرا و بر روی نمونهٔ موردمطالعه متمرکز میکند. این امر مهم ترین



نقش دیگری که میدان مغناطیسی کنترلشده توسط سیمپیچها در میکروسکوپهای الکترونی بر عهده دارد، هدایت پرتو الکترونی همگراشده به جهتی خاص و جابهجایی آن بر روی نمونه است. این فرایند روبش<sup>۲</sup> نامیده میشود و سیمپیچهایی که این عمل را بر عهده دارند، سیمپیچ روبش<sup>۲</sup> یا انحراف<sup>1</sup> نام دارند. این سیمپیچها با قابلیت جابهجایی طولی و عرضی باریکهٔ الکترونی، امکان روبش سطح نمونه را فراهم میکنند. شکل ۱۲ در طرحی ساده، نحوهٔ روبش سطح نمونه توسط باریکهٔ الکترونی را که سیمپیچهای روبش گر آن را هدایت میکند نشان میدهد.

1- Magnetic lens

يرتو الكتروني واكرا

پرتو الکترونی همگرا شده

(ب)

شکل ۱۱: (آ) تصویری از یک عدسی مغناطیسی و (ب) طرحی از پر تو الکترونی

همگراشده توسط عدسی مغناطیسی [۴۲]

- 2- Scanning
- 3- Scanning coil
- 4- Deflection coil

گ*شت*ل چهارم مطالعه ریزساختار نانومواد



برهم کنش پرتو الکترونے با مادہ

میدانید که هر اتم متشکل است از هستهای با بار مثبت در مرکز و ابری از الکترونها که در اطراف آن در حال چرخشاند. با برخورد پرتو الکترونی فرودی با سطح نمونه، این الکترونها، بسته به انرژی که دارند، با اجزای اتمهای نمونه وارد برهمکنش میشوند. تحت تأثیر این برهمکنشها رخدادهای متنوعی صورت میگیرد که حاصل آن برهمکنشها، الکترونها و فوتونهاییاند که با انرژیهای متنوع از نمونه ساطع میشوند. میتوان با استفاده از این الکترونها و فوتونها اطلاعات متنوعی از نمونه بهدست آورد که تصویر میکروسکوپ الکترونی یکی از آنهاست.

با برخورد پرتو الکترونی به سطح نمونه، احتمال رخدادهای متنوعی وجود دارد که میتوان آنها را در موارد زیر خلاصه کرد:

- 🔇 عبور بدون برهم کنش از نمونه (درصورتی که نمونه بهحدکافی نازک و پرتو پرانرژی باشد).
- 📎 عبور همراه برهم کنش از ماده (درصورتی که نمونه به حدکافی نازک و پرتو پرانرژی باشد).
  - 🔅 برهم کنش با ابر الکترونی اتمهای نمونه و تبادل انرژی با الکترونهای ماده.
    - عبور از ابر الكترونى و برهم كنش مستقيم با هستهٔ اتم.

الکترون برخوردکرده با سطح نمونه ممکن است با ابر الکترونی اتمهای نمونه تبادل انرژی داشته باشد و بخشی از انرژی خود را از دست بدهد؛ در این حالت، برهمکنشی غیرالاستیک<sup>۱</sup> رخ داده است. در شرایطی که برهمکنش میان پرتو الکترونی و اتمهای نمونه بدون تبادل انرژی صورت گیرد، این نوع برهمکنش را برهمکنش الاستیک<sup>۲</sup> مینامند. اگر ضخامت نمونه به مقدار کافی کم باشد، ممکن است الکترونهای فرودی در اثر برهمکنش الاستیک یا غیرالاستیک با ابرهای الکترونی تا حدی از مسیر عبوری خود منحرف شود و از نمونه عبور کند (شکل ۱۳– آ)؛ در چنین حالتی، الکترونهای عبوری<sup>۳</sup> توسط ماده پراکنده میشوند ولی ممکن است الکترونها بدون انحراف از ماده هم عبور کند. ازآنجاکه الکترونهای عبوری از درون نمونه عبور کردهاند و با اجزای درونی آن برهمکنش داشتهاند، دربردارندهٔ اطلاعات درونی نمونه هستند. با توجه به اینکه با افزایش جرم اتمی عنصرهای تشکیلدهندهٔ نمونه چگالی ابر الکترونی افزایش

2- Elastic

مطالعه ريزساختار نانومواد

Ser Co

<sup>1-</sup> Inelastic

<sup>3-</sup> Transmitted electrons

مییابد، با افزایش جرم اتمی عناصر تشکیلدهندهٔ نمونه مقدار الکترونهای عبوری کاهش مییابد و میزان انحراف آنها نیز زیاد میشود.

برهم کنش دیگر الکترونهای فرودی و اتمهای نمونه، که معمولاً بهصورت الاستیک رخ میدهد، برهم کنش الکترون فرودی با هستهٔ اتمهای نمونه است. در این حالت، الکترون بدون برهم کنش و تبادل با ابر الکترونی از آن عبور می کند و به هستهٔ اتم میرسد. در چنین شرایطی، جاذبهٔ هسته الکترون را به بسیار از مسیر خود منحرف می کند؛ به نحوی که مسیر جدید الکترون ممکن است خلاف جهت حرکت اولیهٔ آن باشد (شکل ۲۳– ب). این نوع الکترونها را الکترونهای برگشتی (BSE)<sup>1</sup> می نامند؛ زاویهٔ الکترونهای برگشتی، نسبت به مسیر اولیهٔ خود، بین <sup>°</sup> ۱۸۰– ۹۰ است. ممکن است الکترونهای برگشتی در مسیر بازگشت، با سایر اتمها وارد برهم کنش شوند و بخشی از انرژی خود را ز دست بدهند؛ با این وجود این الکترونها حدود ۶۰٪ الی ۸۰٪ انرژی اولیهٔ خود را دارند و میتوانند از حداکثر عمق سس ا ماده خود را به سطح برسانند؛ بنابراین، این الکترونها اطلاعات عمقی نمونه را دربردارند. الکترونهای برگشتی پس از ورود به خلاء انرژی بیش از V ه ۵۰ دارند. با افزایش عدد اتمی عناصر سازندهٔ نمونه بار الکتریکی هسته افزایش می یابد؛ درنتیجه، برهم کنش میان هسته و الکترون قوی تر می شود. از این رو، شدت الکترونهای برگشتی در چنین نمونههایی زیاد است برهم کنش میان هسته و الکترون قوی تر می شود. از این رو، شدت الکترونهای برگشتی در چنین نمونههایی زیاد است و آنها می توانند از عمق بیشتری خود را به سطح مراه ند.

در برهم کنش غیرالاستیک الکترونهای فرودی با الکترونهای اتمهای نمونهٔ موردمطالعه، انتقال انرژی از الکترون فرودی به الکترونهای نمونه موجب میشود تا این الکترون انرژی کافی برای فرار از جاذبهٔ هسته را به دست آورد (شکل ۱۳– پ). ازاینرو، یک الکترون از بند اتم رها میشود و به فضای خلاء وارد می گردد. این نوع الکترونها، که با نام الکترونهای ثانویه (SE)<sup>1</sup> شناخته میشوند، انرژی کمتری نسبت به الکترونهای بر گشتی دارند. این الکترونها پس از ورود به خلاء، انرژی ای حدود ۷۶ ۵۰ – ۳ دارند. بنابراین، الکترونهای ثانویه امکان رسیدن از عمق زیاد نمونه به سطح را ندارند و در بهترین حالت، میتوانند خود را از عمق ۱۰ ما ۱۰ به سطح برسانند. این امر موجب میشود که این الکترونها دربردارندهٔ اطلاعات سطح و نزدیک سطح نمونه باشند.

برهم کنش غیرالاستیک الکترونهای فرودی با ابر الکترونی اتمها، که موجب ایجاد الکترون ثانویه میشود، زنجیرهای از رخدادها را در پی دارد (شکل ۱۳– ت). این زنجیره با گسیل یک فوتون پرتو ایکس آغاز میگردد که به نام پرتو ایکس مشخصه<sup>۲</sup> شناخته میشود، گسیل این فوتون به این شکل صورت است که پس از ایجاد الکترون ثانویه، یک الکترون از ترازهای بالاتر جای خالی این الکترون را پر میکند. از آنجا که الکترون موجود در تراز بالاتر انرژی بیشتری نسبت به پرتو ایکس صورت میگیرد. فاصلهٔ بین ترازهای الکترونی برای هر عنصر مقداری مشخصی است و به شکل نشر یک فوتون پرتو ایکس صورت میگیرد. فاصلهٔ بین ترازهای الکترونی برای هر عنصر مقداری مشخصی است؛ بنابراین پرتو ایکسی که در می نامند. نوع دیگری از اشعهٔ ایکس هم تحت تأثیر کاهش سرعت و انرژی الکترونهای فرودی ایجاد میشود که در بررسی می نامند. نوع دیگری از اشعهٔ ایکس هم تحت تأثیر کاهش سرعت و انرژی الکترونهای فرودی ایجاد میشود که در بررسی می نامند. نوع دیگری از اشعهٔ ایکس هم تحت تأثیر کاهش سرعت و انرژی الکترونهای فرودی ایجاد میشود که در بررسی ار برانگیخته کرده و از اتم جدا کنند. این نوع الکترونها، که در اثر تحریک پرتو ایکس مشود که در بررسی الکترونهای اوژه<sup>۴</sup> مشهورند. این الکترونها انرژی حمی دارند و از عمقی حدود الکترونهای بیرونی ترین لایهٔ الکترونی خلاء می شوند، به می می اورته الکترونهای اوژه می انرژی اخترونها انرژی کمی دارند و از عمقی حدود الکترونهای بیرونی ترین لایهٔ الکترونی شوند، به می وزیه به ایرونهای انرژی اخترونها، که در اثر تحریک پرتو ایکس مشخصه تولید میشوند، به می دونه ای اوژه می میروند. این الکترونها انرژی کمی دارند و از عمقی حدود الا ۱ یا کمتر به سطح می سند و وارد شیمیایی شرکت می کنند، این الکترونها اطلاعاتی درخصوص وضعیت شیمیایی و پیوندی عناصر سطحی دارند.

Ser and and

<sup>1-</sup> Back scattered electron

<sup>2-</sup> Secondary electron

۳- ماهیت پرتو ایکس و نیز پرتوهای ایکس مشخصه (characteristic X-rays) بهطورکامل در ادامهٔ همین فصل و در بخش پرتو ایکس بررسی شده است. 4- Auger electron



و (پ) پر تو ایکس مشخصه و الکترون اوژه می شود

برهم کنش دیگری وجود دارد که در تصویربرداری از ماده با پرتو الکترونی اهمیتی ندارد و با تاباندن پرتو الکترونی به مواد نیمهرسانا رخ میدهد. در این شرایط زوج الکترون – حفره توسط الکترونهای فرودی اولیه تحریک و ماده برانگیخته میشود. در پی بازترکیب زوجهای الکترون – حفره، پرتوهای فرابنفش یا نور مرئی گسیل میشود که با نام پرتوتابی کاتدی<sup>۱</sup> شناخته میشوند. شکل ۱۴ در طرحی ساده، رخدادهای مختلف در اثر برخورد پرتو الکترونی به یک نمونه را نشان میدهد.



می توان از هر یک از رخدادهای صورت گرفته در اثر تابش پرتو الکترونی به سطح نمونه، برای نوع خاصی از مشخصهیابی یا تصویربرداری استفاده کرد. این امر موجب می شود روش های مشخصهیابی متنوعی با استفاده از تابش پرتو الکترونی وجود داشته باشد. در ادامه و با درنظر گرفتن سطح آموزشی این کتاب، موارد استفاده از الکترونهای عبوری، برگشتی و ثانویه برای تصویربرداری و نیز، استفاده از پرتو ایکس مشخصه برای تعیین ترکیب شیمیایی نمونه بررسی خواهد شد. الکترونهای اوژه در تصویربرداری الکترونی کاربرد ندارند و از آنها برای مطالعهٔ خواص شیمیایی سطح استفاده می شود؛ همچنین، با استفاده از یک آشکارساز نور مرئی و پرتوهای فرابنفش نوع خاصی از تصاویر موسوم به تصاویر پرتوتابی

<sup>1-</sup> Cathodoluminescence
کاتدی استفاده میشود که در مطالعه ساختار فازی و ناخالصیهای شیمیایی مواد کاربرد دارد. با توجه به سطح این کتاب، از بررسی بیشتر این دو مورد صرفنظر میشود.

# 🔅 تصویربرداری با استفاده از الکترونهای عبوری

اولین نوع الکترونهایی که از آنها برای تصویربرداری الکترونی استفاده شد، الکترونهای عبوری از نمونه بودند. اولین نوع میکروسکوپ الکترونی ساختهشده میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)<sup>۱</sup> نام دارد که نمونهٔ اولیهٔ آن در ۱۹۳۱ میلادی ساخته شد و در ۱۹۳۹ میلادی، اولین نمونهٔ تجاری آن وارد بازار گشت. امروزه، بهترین میکروسکوپهای الکترونی عبوری میتوانند تصاویری با حداقل بزرگنمایی ۲۰۰۰ تا بیشینه بزرگنمایی ۵۰ میلیون و تفکیک ma ارائه کنند؛ بنابراین، این نوع میکروسکوپها یکی از بهترین انتخابها برای مطالعهٔ ریزساختار انواع مواد، بهویژه نانومواد مختلف، به شمار میروند. امروزه، تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری به بخشی جداییناپذیر از اکثر پژوهشهای حوزهٔ فناوری نانو تبدیل شدهاند. میتوان در تمام میکروسکوپها، با تاباندن پرتو الکترونی و آشکارسازی الکترونهای مختلف ساطع شده از آن تصویری از نمونه تهیه کرد.

# 🔘 آشکارسازی الکترون های عبوری

هر چقدر که تعداد الکترون بیشتری به یک نقطه برسد، آن نقطه روشن تر میشود؛ درمقابل، نبود الکترون منجر به تاریک شدن آن میگردد.

در میکروسکوپهای قدیمی، برای ثبت تصویر از فیلم عکاسی استفاده میشد؛ بهاینترتیب که پس از اطمینان از دستیابی به تصویر مناسب با استفاده از صفحهٔ فسفری، فیلم عکاسی در معرض تابش این الکترونها قرار میگرفت و در اثر برخورد الکترونها به فیلم، تصویر ماندگاری بر روی این فیلم ایجاد میشد و درنهایت، با ظهور فیلم، تصویر نهایی چاپ میگردید. در میکروسکوپهای جدید، از آشکارسازهای الکترونیکی موسوم به افزارهٔ بار جفتشده (CCD)

- 1- Transmission electron microscope
- 2- Phosphor viewing screen
- 3- Charged coupled devices

عسال جهارو



استفاده میشود. سطح آشکارساز الکترونیکی از تعداد بسیار زیادی نقطهٔ حساس به الکترون، موسوم به پیکسل <sup>'</sup> پوشیده شده است که با برخورد هر الکترون به آنها، پیغامی به رایانهٔ دستگاه ارسال میشود. درنتیجه، هنگامی که این آشکارساز در معرض تابش الکترونهای عبوری قرار می گیرد، اطلاعات ارسالی از هر یک از پیکسلها به تشکیل تصویری دیجیتال منجر می گردد.

در میکروسکوپهای الکترونی عبوری اولیه، الکترونهایی که انحراف زیادی داشتند برای تصویربرداری بکارگرفته نمیشدند. با پیشرفت در طراحی این میکروسکوپها و استفاده از سیمپیچهای روبش گر برای روبش پرتو الکترونی بر روی نمونه، امکان استفاده از الکترونهای با انحراف زیاد برای تصویربرداری میسر شد. آشکارسازی این الکترونها با آشکارسازهایی موسوم به آشکارسازهای حلقوی<sup>۲</sup> صورت میگیرد (شکل ۱۶). امروزه، دو نوع آشکارساز حلقوی برای الکترونهای منحرفشده با زاویهٔ کم و زیاد وجود دارد.



الکترونهای عبوری از نمونه را براساس زاویهٔ انحرافشان نسبت به راستای الکترون فرودی دستهبندی میکنند. در متنهای تخصصی این زاویه برحسب میلیرادیان (mrad) بیان میشود که برای سادگی بحث، مقدار آن به درجهٔ (<sup>o</sup>) نیز بیان میگردد. اگر الکترون عبوری از نمونه انحرافی کمتر از <sup>o</sup>/۵۷۳۳ (mrad) داشته باشد، الکترون عبوری بدون انحراف فرض میشود و اگر این انحراف بین <sup>o</sup>/۵۷۳ و ۲/۸۶۵ (mrad) باشد، الکترون دارای انحراف کم خواهد بود؛ انحراف فرض میشود و اگر این انحراف بین <sup>o</sup>/۵۷۳ و ۲/۸۶۵ (mrad) باشد، الکترون عبوری بدون در بهایت، الکترون عبوری از نمونه انحرافی کمتر از <sup>o</sup>/۵۷۳ (mrad) باشد، الکترون عبوری اندراف کم خواهد بود؛ انحراف فرض میشود و اگر این انحراف زیاد میدانند که میزان انحرافشان بیش از <sup>o</sup>/۸۶۵ باشد. در میکروسکوپهای الکترونی عبوری معمولی، آشکارسازی الکترونهای عبوری بدون انحراف یا با انحراف کم با استفاده از افزارهٔ بار جفت شده یا فیلم عکاسی صورت میگیرد. در میکروسکوپهای جفت شده یا فیلم عکاسی صورت میگیرد. در میکروسکوپهای جفت می در دارای ایجراف زیاد میداند که میزان انحرافشان بیش از <sup>o</sup>/۸۶۵ باشد. در میکروسکوپهای جفت شده یا فیلم عکاسی صورت میگیرد. در میکروسکوپهای جفت شده یا فیلم عکاسی صورت میگیرد. در میکروسکوپهای جدیدتر، هر یک از این الکترونها آشکارسازهای خاص خواه را از آشکارساز الکترونهای بدون انحراف را آشکارساز میدان را الکترونهای با انحراف کم را آشکارساز الکترونها آشکارسازهای خاص آشکارساز ایکترونهای با انحراف را آشکارساز الکترونهای با انحراف را آشکارساز میدان تاریک حلقوی زاویهٔ بالا (ADDP)<sup>6</sup> می نامند. شکل ۱۷ در را آشکارساز الکترونهای با انحراف را زیاد را آشکارساز میدان تاریک حلقوی زاویهٔ بالا (ADDP)<sup>6</sup> می نامند. میکل ۱۷ در آشکارساز الکترونهای با انحراف را زیاد را آشکارساز میدان تاریک میلوی زاکترونی عبوری را نشان میدهد.

- 2- Annular detector
- 3- Bright field detector
- 4- Annular dark field detector
- 5- High angel annular dark field detector

مطالعه ريزساختار نانومواد

<sup>1-</sup> Pixel



# 🖲 ساختار و اجزای میکروسکوپ الکترونے عبوری

میکروسکوپهای الکترونی عبوری از رفتار موجی الکترونها در تمام مراحل تصویربرداری استفاده میکنند. بنابراین، میتوان آرایش مشابه آنچه برای میکروسکوپ نوری وجود دارد، مانند شکل ۳، را برای اجزای آنها در نظر گرفت. شکل ۱۸ در طرحی ساده، نحوهٔ همگراشدن و تابش پرتو الکترونی به نمونه و تشکیل تصویر در میکروسکوپهای الکترونی عبوری را نشان میدهد.

امروزه، میکروسکوپهای الکترونی عبوری دارای اجزایی متنوع و ساختاری بسیار پیچیده هستند که سبب دستیابی به بزرگنمایی بسیار بالا و قدرت تفکیک اتمی در تصاویر نهایی میشود. در انواع میکروسکوپهای الکترونی نستال الکترونی در بالا قرار میگیرد و سایر اجزا در راستای پرتو الکترونی نصب میشوند. به این ساختار دراصطلاح، ستون الکترونی<sup>۱</sup> گفته میشود که تمام اجزای موردنیاز برای تولید پرتو الکترونی تا ایجاد تصویر نهایی را دربردارد. میکروسکوپهای الکترونی ممکن است اجزای مختلفی داشته باشند که میتوان با استفاده از آنها تصاویر متنوع الکترونی تهیه کرد و برخی از مشخصهیابیها را که برهم کنش پرتو الکترونی و نمونه آن را ممکن میکند انجام داد. شکل ۱۹



1- Electron column

نصوبر اوليه

تصویر بزرگنمایی شده

شکل ۱۸: طرحی ساده از چیدمان اجزای

ميكروسكوپهاى الكترونى عبورى و مسير عبورى

پر تو الکترونی تا تشکیل تصویر الکترونی [۴۲]

فنك الكتروذ

عدسی شیئ

مطالعه ريزساختار نانومواد

محسال چهارم

مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك

ضروری محسوب میشوند؛ باقی موارد گزینههایی هستند که افزودن آنها به ستون الکترون قابلیتهای جدیدی به میکروسکوپ اضافه میکند. شکل ۲۰ تصویری از اولین میکروسکوپ الکترونی عبوری تجاری و نیز تصویری از یک میکروسکوپ الکترونی عبوری امروزی را نشان میدهد.





شکل ۲۰: تصویری از (آ) اولین میکروسکوپ الکترونی عبوری و (ب) تصویری از یک میکروسکوپ الکترونی عبوری امروزی

💿 کارکرد میکروسکوپ الکترونے عبوری

هنگام کار میکروسکوپ الکترونی عبوری باید کل ستون الکترونی خلاء باشد؛ میزان این خلاء به نوع تفنگ الکترونی که در میکروسکوپ به کاررفته است بستگی دارد (جدول ۱). بهطور معمول، تفنگ الکترونی باریکهٔ الکترونی را با اختلاف پتانسیلی در محدودهٔ ۲۰۰ kV – ۸۰ شتاب میدهد. اگر نمونهٔ مور دمطالعه از عناصر سبک تشکیل شده باشد یا حساسیت بالایی به پرتو الکترونی داشته باشد، باید از اختلاف پتانسیل های کمتر از ۱۰۰ kV برای تصویر برداری استفاده کرد. بااین حال، استفاده از اختلاف پتانسیل موجب افزایش طول موج الکترون و کاهش کیفیت تصویر می شود. عدسیهای همگراکننده با کاهش قطر پرتو الکترونی، آن را همگرا و بر روی نمونه متمرکز میکنند. روزنهٔ همگراکننده نیز بخشی از پرتو الکترونی را که در عدسی همگراکنندهٔ اول همگرا نشده است حذف میکند تا کیفیت پرتو الکترونی افزایش یابد. ممکن است در نسل جدید میکروسکوپهای الکترونی عبوری، بین عدسیهای همگراکننده از سیمپیچهای روبش گر استفاده شود تا پرتو الکترونی را بر روی نمونه جابهجا کنند. پرتو الکترونی پس از برهمکنش با نمونه و عبور از آن، توسط عدسی شیئی همگرا میشود و تصویر اولیه از نمونه شکل میگیرد (به شکل ۱۸ مراجعه کنید). در ادامه روزنهٔ شیئی بخشی از الکترونهای عبوری را، بسته به نوع تصویر نهایی و با انتخاب کاربر، حذف میکند. درنهایت، پرتو عبوری به عدسیهای تصویرساز <sup>۱</sup> میرسد و این عدسیها تصویر بزرگنماییشدهٔ نهایی را به آشکارسازها میرسانند.

یکی از مهمترین نکاتی که باید در کارکرد انواع میکروسکوپهای الکترونی مدنظر قرار گیرد، حساسیت بسیار بالای آنها به هر نوع لرزش محیطی است. از آنجاکه هدف میکروسکوپهای الکترونی دستیابی به بزرگنماییهایی از مرتبهٔ چند هزار تا چند میلیون برابر است، کوچکترین لرزشی میتواند به جابهجایی نمونه منجر شود و تصویربرداری را با مشکل مواجه کند. ازاینرو، معمولاً میکروسکوپهای الکترونی را در طبقات زیرزمین و بر روی پایههای ضدارتعاش نصب میکنند.

🔘 آمادهسازی نمونه برای تصویربرداری میکروسکوپ الکترونے عبوری

برای تصویربرداری الکترونی عبوری نمونهٔ آمادهشده را روی یک توری نازک از جنس مس، که قطری برابر mm ۳ و ضخامتی حدود mm ۰/۱ دارد، قرار میدهد. در برخی موارد، این توری ممکن است با کربن پوشیده شده باشد (شکل ۲۱- ب). این توری بر روی نگهدارندهٔ مخصوصی (شکل ۲۱- آ) نصب میشود (شکل ۲۱- پ و ت) و وارد ستون الکترونی می گردد.



شکل ۲۱: (آ) نگهدارندهٔ نمونه، (ب) توری مسی ساده و دارای پوشش کربنی و (پ و) تثبیت توری مسی بر روی نگهدارنده

برای دستیابی به بیشترین کیفیت تصویر، که شامل بزرگنمایی و تفکیک بالا میشود، نیاز است ضخامت نمونههایی که از عناصری با عدد اتمی بالا تشکیل شدهاند، کمتر از ۱۰۰ ساشد تا پرتو الکترون عبوری باکیفیتی مناسب برای تصویربرداری ایجاد شود. آمادهسازی نانوذرات برای تصویربرداری تقریباً، سادهترین فرایند آمادهسازی نمونه برای تصویربرداری الکترونی عبوری است؛ به این ترتیب که نانوذرات را با اختلاط شدید در یک مایع، که در برابر ساختار نانوذرات بی اثر است (مانند اتانول)، پخش می کنند؛ سپس چند قطره از این مخلوط را بر روی توری مسی می ریزند. نانوذرات میان سوراخهای توری جای می گیرند و می توان از آنها تصویربرداری کرد. نانوساختارهای یک بعدی، مانند نانوسیمها و نانولولهها و نانوساختارهای دوبعدی، مانند نانوصفحههایی همچون گرافن که فاقد زیرلایه اند و می توان آنها را در محیط مایع پخش نموده و به راحتی آماده سازی کرد. با استفاده از اختلاط شدید، این نانومواد را در مایع پخش می کنند و چند قطره مایع را روی توری می چکانند. آمادهسازی از نمونههایی که ابعاد بزرگی دارند برای تصویربرداری الکترونی عبوری امری چالشبرانگیز است. انواع مواد تودهای و نانوساختارهای دوبعدی، که به شکل پوشش روی سطح مادهٔ تودهای اعمال شدهاند، ازجملهٔ این موارد محسوب می شوند. آمادهسازی این نوع نمونهها برای تصویربرداری الکترونی عبوری به فرایندهای برش مقطعی خاص نیاز دارد که بسیار حساس و هزینهبر است و معمولاً، افراد متخصص آن را انجام می دهند. لازم به ذکر است که نمونههای مورداستفاده در میکروسکوپهای الکترونی باید کاملاً خشک باشند و در شرایط خلاء، هیچ گازی از خود منتشر نکنند؛ در غیراین صورت ممکن است گازهای ساطع شده از نمونه به اجزای درونی میکروسکوپ، به ویژه به تفنگ الکترونی آن، صدمه بزنند.

## 🖲 حالتہای تصویربرداری میکروسکوپ الکترونے عبوری

بر اساس آنچه گفته شد، هنگامی که پرتو الکترونی از نمونه عبور می کند، سه نوع الکترون عبوری ایجاد می شود. استفاده از هر یک از این نوع الکترونهای عبوری منجر به نوعی خاص از تصاویر می شود. میکروسکوپهای الکترونی عبوری در حالت کلی، سه حالت تصویربرداری دارند. امروزه، میکروسکوپهای الکترونی عبوری بسته به اینکه به سیمپیچهای روبش الکترونی و آشکارسازهایی مانند آشکارسازهای حلقوی میدان تاریک و آشکارسازی میدان روشن مجهز هستند یا خیر، به دو دستهٔ میکروسکوپ الکترونی عبوری عادی (CTEM)<sup>۱</sup> که فاقد این تجهیزات است و میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی (STEM)<sup>۲</sup> که مجهز به این تجهیزات است، تقسیم می شوند. لازم به ذکر است که CTEM ها معمولاً TEM خطاب می شوند.

#### 🔸 حالتهای تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی عبوری عادی

در آغاز تصویربرداری، ترکیبی از هر سه نوع الکترون عبوری به صفحهٔ دید می سد؛ این پرتوها با هم تداخل پیدا می کنند و تصویر مبهمی ایجاد می شود. از این رو، با استفاده از وسیله ای موسوم به روزنهٔ شیئی<sup>۳</sup> بخشی از پرتوها حذف می گردد تا فقط یک نوع پرتو عبوری برای ایجاد تصویر استفاده شود. از آنجا که میکروسکوپهای الکترونی عادی روبش گرهای الکترونی ندارند، فقط از الکترونهای عبوری بدون انحراف یا با انحراف کم برای تصویربرداری استفاده می کنند. بر این اساس، با استفاده از میکروسکوپهای الکترونی عادی می توان دو نوع تصویر تهیه کرد. معمولاً، در این نوع میکروسکوپها تصویر با استفاده از فیلم عکاسی یا افزارهٔ بار جفت شده برای تشکیل تصویر ایجاد می شود. میکروسکوپهای الکترونی عبوری به دلیل ساختار و تجهیزات ساده تری که نسبت به میکروسکوپهای الکترونی عبوری روبشی دارند، ارزان ترند ولی بزرگنمایی، قدرت تفکیک و وضوح تصویر کمتری دارند.

تصویر میدان روشن: اگر روزنهٔ شیئی از رسیدن الکترونهای منحرفشده به صفحهٔ دید و آشکارسازی جلوگیری کند، تصویری ایجاد میشود که زمینهٔ آن روشن است و اجزایی از نمونه که موجب انحراف و پراکندگی الکترونها شدهاند، در تصویر تاریک دیده میشود. چنین تصویری را، که با استفاده از پرتو الکترون عبوری بدون انحراف تشکیل میشود، تصویر میدان روشن<sup>۴</sup> مینامند. دلیل تاریک دیدهشدن بخشهایی از نمونه ممانعت از عبور بدون انحراف الکترون از این نواحی است؛ نمونه ممکن است در این بخشها ضخامت یا چگالی بالایی داشته باشد یا آن بخش از نمونه از عناصر سنگین تشکیل شده باشد که میتوانند پرتو الکترونی را بیشتر منحرف کنند. بخش زیادی از الکترونها بدون انحراف از نمونه عبور میکنند. این امر موجب میشود که تصویر زمینهٔ روشنی داشته باشد. شکل (۲۲– آ) با طرحی ساده نحوهٔ ایجاد چنین تصویری را نشان میدهد. مطالعه ريزساختار نانومواد

<sup>1-</sup> Conventional transmission electron microscope

<sup>2-</sup> Scanning transmission electron microscopy

<sup>3-</sup> Objective aperture

<sup>4-</sup> Bright field image

تصویر میدان تاریک: اگر روزنهٔ شیئی مسیر عبور الکترونهای منحرفنشده را مسدود کند و اجازه دهد الکترونهای با انحراف کم به صفحهٔ دید و آشکارساز برسند (شکل ۲۲– ب)، تصویری ایجاد خواهد شد که زمینهٔ آن تاریک است و اجزایی از نمونه، که موجب پراکندگی و انحراف الکترونها شدهاند، روشن دیده میشوند. این نوع تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری را که با استفاده از الکترونهای با انحراف کم ایجاد میشود، تصویر میدان تاریک<sup>۱</sup> مینامند. دلیل تاریکبودن زمینه در این نوع تصاویر این است که معمولاً بخش زیادی از الکترونهای عبوری از نمونه بدون انحرافاند یا انحراف کمی دارند؛ ازاینرو، ممانعت از رسیدن این الکترونها به آشکارساز موجب ایجاد زمینهٔ تاریک در تصویر نهایی میشود.



شکل ۲۲: طرحی ساده از نحوهٔ ایجاد (آ) تصویر میدان روشن و (ب) تصویر میدان تاریک در یک میکروسکوپ الکترونی عبوری

شکل ۲۳ نشان دهندهٔ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری در دو حالت تصویر برداری میدان روشن و تاریک از نانولولههای کربنی چنددیواره است که نانوذرات نقره بر روی آنها نشانده شدهاند. در تصویر میدان روشن، نانوذرات نقره بهصورت نقاط تاریک بر روی نانولولههای کربنی قابل مشاهدهاند؛ در حالی که در تصویر میدان تاریک، نانوذرات نقره به صورت نقاط روشن مشاهده می شوند.



شکل ۲۳: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانولولدهای کربنی چندجداره و نانوذرات نقرهٔ تثبیتشده بر روی آنها [۴۸]

شکل ۲۴ نشاندهندهٔ تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری میدان روشن و میدان تاریک از یک نمونهٔ زیرکونیم اکسید (ZrO<sub>2</sub>) دارای دانهبندی میکرومتری است. هر دو تصویر از یک نقطه تهیه شدهاند. در تصویر میدان روشن، برخی از دانهها به رنگ تیره دیده میشوند. این نواحی الکترونهای عبوری را منحرف میکنند و سبب تیرگی خود در تصویر میشوند. در تصویر میدان تاریک، دو مورد از دانههای موجود بسیار روشنتر از باقی دانهها دیده میشوند؛ زیرا جهتگیری بلوری این دانهها در راستایی است که بیشترین مقدار الکترون عبوری را منحرف میکنند.

\_\_\_\_\_



شکل ۲۴: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (آ) میدان روشن و (ب) میدان تاریک از یک نمونهٔ زیر کونیم اکسید دارای دانهبندی میکرومتری [۴۹]

اگر در تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی عبوری عادی، نمونه به حدکافی ناز ک باشد (کمتر از ۱۰۰ mm)، برهم کنشهای الاستیک الکترونهای تابانده شده به نمونه بیشتر از برهم کنشهای غیرالاستیک خواهد بود. ممکن است صفحات اتمی پرتو عبوری را به صورت منظم منحرف کنند. در چنین شرایطی و در بزرگنماییهای بیشتر از ۴۰۰۰۰۰، پرتوهای عبوری با یکدیگر تداخل میکنند و الگوی قابل مشاهدهای می سازند که نشان دهندهٔ محل قرار گیری اتمها در نمونه است. این نوع تصاویر دراصطلاح، تصویر الکترونی عبوری تفکیک بالا (HR-TEM)<sup>۱</sup> نامیده می شوند. شکل ۲۵ نشان دهندهٔ تصویر HR-TEM از یک نانوبلور سریم اکسید (CeO) است. امروزه، می توان چنین تصاویری با قدرت تفکیک کمتر از mn ۱/۰ تهیه کرد.



یک نانوبلور سریم اکسید [۴۷]

## 🛧 حالتهای تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی

با استفاده از میکروسکوپهای الکترونی عبوری معمولی، امکان هدایت پرتو الکترونی و جابهجایی آن بر روی نمونه وجود ندارد. ازاینرو، پرتو الکترونی را روی ناحیهای از نمونه که به تصویربرداری نیاز دارد متمرکز میکنند. با این کار تصویربرداری امکان پذیر میشود. بهعبارتی دیگر، در چنین شرایطی قطر پرتو تابانده شده برابر است با قطر ناحیهای از نمونه که تصویربرداری میشود. در سال ۱۹۷۰ میلادی، با اختراع تفنگ الکترونی نشر میدانی و به کارگیری سیم پیچهای روبش گر در میکروسکوپهای الکترونی عبوری، نسل جدیدی از میکروسکوپهای الکترونی عبوری معرفی شدند که به سیم پیچهای روبش گر مجهز بودند. این نوع میکروسکوپها توان متمرکز کردن پرتو الکترونی و روبش آن روی سطح نمونه را دارند. این امر موجب می گردد بزرگنمایی و تفکیک بسیار بهتری از میکروسکوپهای الکترونی عبوری معروی عادی حاصل شود؛ به نحوی که برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ میلادی، میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی تصویربرداری از تک اتمها را امکان پذیر ساخت. امروزه، STEMها با اصلاح انحراف<sup>1</sup> پرتو الکترونی، میتوانند پرتو الکترونی را با قطری در حدود nm ۰/۲ – ۰/۲ روی نمونه متمرکز کنند و تصاویری با بزرگنمایی ۱۰ میلیون برابر و قدرت تفکیک کمتر از mu ۵۰ ایجاد کنند. بیشترین بزرگنمایی گزارششده با این نوع میکروسکوپها برابر ۵۰ میلیون است. چنین بزرگنمایی امکان مشاهدهٔ چیدمان اتمها در نمونههای مختلف را فراهم میکند. البته، باید به این نکته توجه کرد که در صورتی میتوان چنین تصاویری تهیه کرد که نمونه در اثر برخورد پرتو پرتوان الکترونی آسیب نبیند و تصویربرداری را ممکن کند.

ميكروسكوپهاى الكتروني عبوري روبشي پرتو الكتروني متمركز را نقطه به نقطه بر روى نمونهٔ مور دمطالعه جابه جا مي كنند. در فرایند پیمایش سطح، که به آن روبش میگویند، بخشی از پرتو الکترونی تاباندهشده به نمونه از آن عبور میکند. و از طریق آشکارسازهای خاصی شدت پرتو عبوری اندازهگیری می شود. به این تر تیب، متناظر با هر نقطه ای که پرتو الكترون به آن تابانده می شود، براساس شدت الكترون های عبوری، یک نقطه با شدت روشنی مشخص ایجاد می شود. با اتمام روبش نمونه و کنار هم قرارگرفتن این نقطهها، تصویر نهایی تشکیل می گردد. باید در نظر داشته باشید که در میکروسکوپ الکترونی عبوری عادی، تشکیل تصویر بهصورت یکجا صورت می گیرد؛ درحالی که در میکروسکوپهای روبشی، تصویر نهایی با روبش نقطهبهنقطه و تجمیع این نقطهها تشکیل میشود. ازاینرو، فرایند ایجاد تصویر در میکروسکوپهای الکترونی عبوری روبشی متفاوت از آن چیزی است که در شکل ۱۸ نشان داده شد. بااینوجود، اگر یک میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی به صفحهٔ دید و آشکارساز CCD یا فیلم عکاسی مجهز باشد، میتواند همانند میکروسکوپهای الکترونی عبوری عادی تصویربرداری کند. این فرایند تصویرسازی به آشکارسازهای متفاوت از آنچه در میکروسکوپهای عادی استفاده میشود نیاز دارد. میکروسکوپهای الکترونی عبوری روبشی میتوانند از هر سه نوع الكترون عبوري براي تصويرسازي استفاده كنند. ازاينررو، اين ميكروسكوپها از هر سه نوع آشكارساز معرفيشده در شکل ۱۷ استفاده می کنند. این آشکار ساز ها عبارت انداز آشکار ساز میدان روشن (BF)، آشکار ساز میدان تاریک حلقوی (ADF) و آشكارساز ميدان تاريك حلقوى زاويهٔ بالا (HAADF). بنابراين، اين ميكروسكوپها سه حالت تصويربردارى دارند. وجود این سه نوع آشکارساز میکروسکوپهای الکترونی عبوری روبشی را از روزنهٔ شیئی، که وظیفهٔ انتخاب نوع الکترونهای عبوری در میکروسکوپهای الکترونی عبوری عادی را بر عهده دارد، بینیاز میکند و این امکان را فراهم میسازد که بتوان بهطور همزمان، با استفاده از هر سه آشکارساز تصویربرداری کرد.

در انواع تصاویر تهیهشده با میکروسکوپ الکترونی روبشی، اگر بزرگنمایی کافی داشته باشند، امکان مشاهدهٔ اتمها وجود دارد. این امر موجب می گردد که در بسیاری موارد، به چنین تصاویری تصویر تفکیک بالا گفته شود؛ درحالی که تصویر HR-TEM دلالت به تصویر حاصل از میکروسکوپهای الکترونی عبوری عادی در بزرگنماییهای بیشتر از ۴۰۰۰۰۰ برابر دارد.

> تصویر میدان روشن: تصویر میدان روشن حاصل از میکروسکوپهای الکترونی عبوری روبشی، که با استفاده از آشکار ساز میدان روشن (BF) تهیه می شود، از نظر ظاهری مشابه تصویر حاصل از میکروسکوپ روبشی، در مقایسه با عبوری عادی است. تصاویر حاصل از میکروسکوپ روبشی، در مقایسه با میکروسکوپ عادی، بزرگنمایی و تفکیک بسیار بالاتری دارد؛ به نحوی که در این تصاویر می توان به راحتی صفحات بلوری و اتم ها را مشاهده کرد. شکل ۲۶ تصویر میدان روشن حاصل از میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی (BF–STEM) از دو نانوذرة تیتانیوم دی اکسید را نشان می دهد. در این تصویر صفحات بلوری این نانوذرات به خوبی و وضوح قابل مشاهده اند.



تصویر میدان تاریک حلقوی: تصویر میدان تاریک در میکروسکوپهای الکترونی عبوری روبشی، همانند میکروسکوپهای عادی، با استفاده پرتوهایی که انحراف کمی دارند تشکیل می شود. آشکارساز استفاده شده برای این Toggy (می آسکارساز حلقوی میدان تاریک (ADF) است؛ ازاینرو این تصاویر را به صورت اختصاریADF-STEM مورد اشاره قرار می دهند. لازم به ذکر است که میکروسکوپهای الکترونی عبوری عادی آشکارساز ADF دارند، بنابراین ممکن است این تصاویر ADF-TEM هم خطاب شوند. همانند مثال قبلی، این تصاویر از نظر ظاهری تفاوتی با تصویر میدان تاریک حاصل از میکروسکوپهای عادی ندارند و فقط دارای بزرگنمایی و تفکیک بسیار مناسب تریاند. شکل ۲۷ نشان دهندهٔ دو تصویر BF-STEM و ADF-STEM از دو نانوذرهٔ طلاست. کیفیت، وضوح و تفکیک موجود در این تصاویر نشان دهندهٔ قدرت بالای میکروسکوپهای الکترونی عبوری روبشی در تصویرداری از انواع نانومواد است.



شکل ۲۷: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی (آ) میدان روشن و (ب) میدان تاریک حلقوی از دو نانوذرهٔ طلا [۵۱]

تصویر میدان تاریک حلقوی زاویه بالا: سومین گروه از الکترونهای عبوری، الکترونهاییاند که با زاویهٔ زیادی نسبت به راستای پرتو الکترونی فرودی پراکنده شدهاند. شدت این نوع الکترونها بسیار وابسته به عدد اتمی عناصری است که الکترونها با آن برهم کنش داشتهاند؛ زیرا برهم کنش قوی هستهٔ اتم با الکترون فرودی با افزایش عدد اتمی بیشتر می شود. با افزایش عدد اتمی، تعداد الکترون بیشتری در زاویهٔ بالا پراکنده خواهند شد. ازاینرو آشکارسازهای HAADF الکترونهای بیشتری از اتمهای سنگین موجود در نمونه دریافت می کنند.

الکترونهایی که با زاویهٔ کم منحرف میشوند، معمولاً در اثر برهم کنش با ابر الکترونی اتمهای نمونه منحرف میشوند. این الکترونها ممکن است به دلیل چیدمان منظم اتمها در نمونه انحراف منظمی داشته باشند؛ درحالی که الکترونهای منحرف شده با زاویهٔ زیاد به طور مستقیم، با هستهٔ اتم برهم کنش دارند و دارای انحراف بی نظم اند. در حالت کلی، تصاویری که آشکارساز HAADF ایجاد می کنند تفاوت ظاهری چندانی با تصاویر تهیه شده با آشکارساز ADF ندارد. هنگامی که نمونهٔ موردمطالعه از عناصری تشکیل شده باشد که عدد اتمی نزدیک به هم دارند یا ریز ساختار نمونه به گونهای باشد که الکترونهای زیادی را منحرف کند، ممکن است تصاویر ADF نتوانند اتمهای مختلف را از هم تفکیک کنند. این در حالی است در چنین مواردی، تصاویر HAADF به راحتی میتوانند تصویری واضح از این عناص رائه کنند. شکل ۲۸ تصاویر BF، والم واله اناوزرات پلاتین درون نانولولههای سیلیکون اکسید را نشان می دهد. نانوزرات پلاتین در شکل (۲۸– پ)، در مقایسه با شکل (۲۸– ب)، با وضوح بیشتری قابل تشخیص است. در شکل (۲۸– ب) می کند؛ در حالی این ایک را منحرف کنده میشوند و این امر تفکیک آنها راز نانوذرات پلاتین کمی دشوار می نانوزرات پلاتین در شکل (۲۸– پ)، در مقایسه با شکل (۲۸– ب)، با وضوح بیشتری قابل تشخیص است. در شکل (۲۸– پ)، در موان دیده میشوند و این امر تفکیک آنها را از نانوذرات پلاتین کمی دشوار می کند؛ در حالی که در شکل (۲۸– پ)، در مقایسه با شکل (۲۸– ب)، با وضوح بیشتری قابل تشخیص است. در شکل (۲۸– ب) می کند؛ در حالی که در شکل (۲۸– پ)، در مقایسه با شکل (۲۸– ب)، با وضوح بیشتری قابل تشخیص است. در شکل (۲۸– ب) می کند؛ در حالی که در شکل (۲۸– پ)، در مقایسه با شکل (۲۸– ب)، با وضوح بیشتری قابل تشخیص است. در شکل (۲۸– ب) می کند؛ در حالی که در شکل (۲۸– پ)، در مقایسه با شکل (۲۸– ب)، با وضوح بیشتری قابل تشخیص است. در شکل (۲۸– پ)، می ونوره نانولوله های سیلیکون اکنید بسیار کم شده است و ناوذرات پلاتین قابل می کند؛ در حالی که در شکل (۲۸– پ)، دروش دیده میشوند و این امر تفکیک آنها را از نانوذرات پلاتین کمی دشوار می کند؛ در حالی این امر حساسیت بالای الکترونه می می می کرده است و در این تصویر روشنتر دیده می شود.



شکل ۲۸: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوذرات پلاتین درون نانومیلههای سیلیکون اکسید در حالتهای (آ) میدان روشن، (ب) میدان تاریک حلقوی و (پ) میدان تاریک حلقوی زاویه بالا [۴۹]

# 📎 \_ تصویربرداری با استفاده از الکترونهای برگشتی و ثانویه

دومین گروه الکترونهای حاصل از برهم کنش پرتو الکترونی با ماده، که برای ایجاد تصویر از آنها استفاده شد، الکترونهای ثانویه و برگشتی بودند. استفاده از این الکترونها برای تصویربرداری مشابه فرایند تاباندن نور به سطح ماده و ایجاد تصویر از پرتوهای بازتاب شده است. یک مهندس آلمانی در سال ۱۹۳۷ میلادی، اولین نوع میکروسکوپهایی را به کار برد که از الکترونهای ثانویه یا برگشتی برای تصویربرداری از سطح مواد استفاده کردند . این نوع میکروسکوپهایی را به کار برد که الکترونی را بهصورت نقطهای متمرکز بر روی سطح نمونه روبش میکنند و با آشکارسازی الکترونهای ثانویه یا برگشتی تصویری از نمونه میسازند، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)<sup>۱</sup> نامیده میشوند. اولین نمونۀ تجاری میکروسکوپ الکترونی روبشی در سال ۱۹۶۵ میلادی به بازار عرضه شد. امروزه، با پیشرفتهای صورت گرفته درزمینۀ طراحی و ساخت این نوع میکروسکوپه، تصاویری با بزرگنمایی تا ۵۰۰ هزار برابر و تفکیکی بهتر از ۱۳ ۱۰ در دسترس است.

## آشکارسازی الکترون های ثانویه و برگشتے

با برخورد پرتو الکترونی به سطح نمونه، دو گروه الکترون ثانویه (با انرژی ۷۵ ۵۰ – ۳) و برگشتی (با انرژی بیش از ۵۰ eV) از سطح نمونه وارد محیط خلاء می شوند. هر یک از این الکترون ها آشکار ساز خاص خود را دارند. در میان آنها، الکترون های ثانویه برای تصویربرداری از سطح و مطالعهٔ پستی و بلندی استفاده می شوند. از این رو، مهم ترین آشکار ساز در میکروسکوپ های الکترونی روبشی، آشکار ساز الکترون های ثانویه است.

**آشکارسازی الکترونهای ثانویه**: متداول ترین آشکارساز برای الکترونهای ثانویه آشکارسازی به نام اورهارت – ترنلی (ET)<sup>۲</sup> است. اساس آشکارسازی الکترونها در این نوع آشکارساز، فرایندی موسوم به جرقهزدن یا سوسوزدن<sup>۳</sup> است؛ بهاین ترتیب که الکترون در یک میدان الکتریکی شتاب می گیرد و به سطحی برخورد می کند که با مواد حساس به الکترون (مواد فلورسنت) پوشش داده شده است. با برخورد الکترون، مادهٔ حساس از خود نور گسیل می کند. در ادامه، نور حاصل از این فرایند تقویت می آشکارساز الکترونیکی آشکار مازی می تود می کند که با مواد حساس به به این ترتیب که الکترون در یک میدان الکتریکی شتاب می گیرد و به سطحی برخورد می کند که با مواد حساس به الکترون (مواد فلورسنت) پوشش داده شده است. با برخورد الکترون، مادهٔ حساس از خود نور گسیل می کند. در ادامه، نور حاصل از این فرایند تقویت می شود و توسط یک آشکارساز الکترونیکی آشکار می گردد. درنهایت، با شمارش دفعات جرقهزدن، تعداد الکترونها شمرده می شوند.

الکترونهای ثانویه بهصورت تصادفی و پراکنده از سطح نمونه ساطع میشوند؛ بنابراین باید به سمت آشکارساز هدایت گردند. الکترونهای ثانویه انرژی جنبشی کمی دارند؛ ازاینرو بهراحتی تحت تأثیر میدان الکتریکی قرار می گیرند.

2- Everharte - Thornley

3- Scintillation

<sup>1-</sup> Scanning electron microscope

از این امر در آشکارسازهای الکترونهای ثانویه برای هدایت این الکترونها به محل آشکارسازی استفاده میشود؛ بهاینصورت که در ورودی آشکارساز یک توری فلزی نصب میشود و به آن اختلاف پتانسیلی در حدود ۲۰۰۷ + اعمال میشود. این اختلاف پتانسیل الکترونهای ثانویه ساطعشده از نمونه را به سمت دهانهٔ آشکارساز هدایت می کند. این در حالی است که الکترونهای برگشتی، که انرژی جنبشی بسیار بالایی دارند، بدون انحراف از جاذبهٔ میدان الکتریکی موجود بر روی این توری عبور می کنند. به غیر از الکترونهای ثانویه، فقط الکترونهایی که به شکل تصادفی هم راستای ورودی آشکارساز حرکت می کنند می توانند وارد آشکارساز شوند؛ ولی با توجه به زاویهٔ قرار گیری آشکارساز نسبت به نمونه، احتمال چنین اتفاقی بسیار کم است.

الکترونهای ثانویه پس از ورود به آشکارساز، تحت میدان الکتریکی در حدود ۲۷ ۱۰+ شتاب می گیرند و به جرقهزن موجود در انتهای مسیر برخورد می کنند. این برخورد جرقهای ایجاد می کند که در ادامه، نور حاصل از آن تقویت می شود و توسط آشکارسازهای الکترونیکی آشکار می گردد. از این طریق الکترونهای ثانویه، که در هر لحظه از سطح نمونه ساطع شدهاند و به آشکارساز رسیدهاند، شمرده می شوند. شکل ۲۹ طرحی ساده از اجزای آشکارساز الکترون ثانویه ET و تصویری از بخش نوری این آشکارساز را نشان می دهد.



امروزه، آشکارسازهایی ساخته شدهاند که از مواد نیمهرسانا برای آشکارسازی و شمارش الکترونهای ثانویه استفاده میکنند. بااینوجود آشکارساز اورهارت-ترنلی همچنان پرکاربردترین آشکارساز برای الکترونهای ثانویه است.

آشکارسازی الکترونهای برگشتی: الکترونهای برگشتی انرژی بسیار بیشتری از الکترونهای ثانویه دارند (حدود ۶۰٪ الی ۸۰٪ انرژی پرتو اولیه) و با پرتو اولیه زاویهای حدود °۱۸۰–۹۰ دارند. آشکارسازی این نوع الکترونها با استفاده از فرایند جرقهزدن ممکن است؛ بنابراین میتوان از آشکارساز اورهارت-ترنلی برای آشکارسازی این الکترونها استفاده کرد. برای این کار فقط نیاز است که ورودی آشکارساز در راستای مناسب قرار بگیرد و به توری آن اختلاف پتانسیل منفی اعمال شود تا الکترونهای ثانویه را، که کم انرژی هستند، دفع کند. استفاده از این نوع آشکارسازها برای الکترونهای برگشتی چندان مناسب نیست؛ زیرا الکترونهای برگشتی به شکل تصادفی در محیط پراکنده میشوند؛ همچنین، این امکان وجود ندارد که همزمان الکترونهای کمانرژی را با اعمال پتاسیل منفی دفع کرد و الکترونهای برگشتی را با ایجاد پتانسیل مثبت (همانند آنچه برای الکترونهای ثانویه صورت میگیرد) به سمت آشکارسازها برای الکترونهای برگشتی را با یجاد پتانسیل منفی به سمت آشکارساز هدایت کرد. این امر باعث میشود که بازدهی این نوع آشکارسازها برای الکترونهای برگشتی به برای ایکترونهای برگشتی

امروزه، برای آشکارسازی الکترونهای برگشتی از آشکارسازهای نیمهرسانا استفاده می شود. برخورد این الکترونها به آشکارساز موجب ایجاد زوج الکترون – حفره در نیمهرسانا می شود. تعداد این زوجها به انرژی الکترونها و تعداد الکترونهای برگشتی برخوردکرده با آشکارساز بستگی دارد. با ایجاد الکترون – حفره در نیمهرسانا، پیغام الکترونیکی

مطالعه ريزساختار نانومواد

به رایانهٔ آشکارساز ارسال میگردد و از طریق آن تعداد الکترونها شمرده میشود. آشکارسازهای نیمهرسانای الکترون برگشتی در بالای نمونه و هممحور با پرتو الکترونی نصب میشوند؛ از این طریق بیشترین تعداد الکترون برگشتی قابل آشکارسازی است. شکل ۳۰ طرحی از نحوهٔ قرار گیری دو آشکارساز معمول برای الکترونهای ثانویه و برگشتی نسبت به نمونه و پرتو الکترونی و تصویری از قرار گیری این دو آشکارساز درون محفظهٔ میکروسکوپ الکترونی روبشی را نشان میدهد.



محفظة ميكروسكوپ الكترونى

تفنك الكتروني

عدسي شيئي

راستا روبش نمونه

نمەنە

و نحوهٔ تاباندن پر تو الکترونی به سطح نمونه و آشکارسازی

الكترون هاي ثانويه [۴۲]

عدسي همكرا كننده

💿 ساختار واجزای میکروسکوپ الکترونے روبشے

الکترونهای ثانویه و برگشتی بهطور تصادفی و یراکنده از سطح نمونه ساطع مىشوند؛ بنابراين نمى توان با استفاده از این نوع الکترونها تصویر تهیه کرد؛ مانند آنچه برای ميكروسكوپهاي الكتروني عبوري عادي كه براساس رفتار موجى پرتو الكتروني صورت مي گيرد (شكل ١٨)، اين امر موجب می شود که میکروسکوپهای الکترونی روبشی اجزای متفاوتی برای آشکارسازی الکترون داشته باشند و فرایند تصویرسازی آنها با آنچه برای یک میکروسکوپ نوری در شکل ۳ نشان داده شد، متفاوت باشد. شکل ۳۱ طرحی ساده از اجزای اصلی یک میکروسکوپ الکترونی روبشی، نحوهٔ تاباندن پرتو الکترونی به سطح نمونه و دریافت الكترونها را نشان مىدهد.

در میکروسکوپ الکترونی روبشی، همانند ساختاری که برای میکروسکوپ الکترونی عبوری وجود دارد، تفنگ الکترونی در بالای ستون الکترونی قرار دارد و الکترونهای ساطع شده از آن توسط آند شتاب داده میشوند. این نوع میکروسکوپها میتوانند با اجزای مختلفی تجهیز شوند؛ با اینحال اجزایی که وجود آنها ضروری است شامل تفنگ الکترونی، آند شتابدهنده، عدسی های همگراکننده و شیئی، سیم پیچهای روبش گر و آشکار ساز الکترون های ثانویه است. شکل ۳۲ اجزای ضروری و برخی از اجزای متداول مورداستفاده در ستون الکترونی یک میکروسکوپ الکترونی روبشی را نشان میدهد.

**ییمپیچهای روبشگر** 

آشكارساز الكترون ثانيوه

كحسال وكهارم



تمام میکروسکوپهای الکترونی روبشی باید به یک آشکارساز الکترونهای ثانویه مجهز باشند. علاوه بر این، آشکارسازهایی مانند آشکارساز پرتوایکس و آشکارساز الکترونهای برگشتی هم ممکن است برای افزایش قابلیتهای دستگاه بر روی آن نصب شوند. شکل ۳۳ تصویری از نخستین میکروسکوپ الکترونی روبشی ساختهشده، نخستین میکروسکوپ الکترونی روبشی تجاری و یک میکروسکوپ امروزی را نشان میدهد.



شکل ۳۳: تصویری از (آ) نخستین میکروسکوپ الکترونی روبشی ساختهشده، (ب) نخستین میکروسکوپ الکترونی روبشی تجاری و (ب) یک میکروسکوپ امروزی

# گتےل چہارم مطالعہ ریزساختار نانومواد

💿 کارکرد میکروسکوپ الکترونے روبشے

ستون الکترونی میکروسکوپهای الکترونی روبشی باید هنگام کار در شرایط خلاء باشد. میزان این خلاء به نوع تفنگ الکترونی میکروسکوپ بستگی دارد. این نوع میکروسکوپها، در مقایسه با میکروسکوپهای الکترونی عبوری، به خلاء کمتری نیاز دارند. معمولاً، پرتو الکترونی در میدانی با اختلاف پتانسیل ۲۰ –۱۰ شتاب داده میشود که در بیشتر موارد، اختلاف پتانسیل مورداستفاده حدود ۲۰ «۲۰ است. بااین وجود میتوان از اختلاف پتانسیل کمتری برای شتاب الکترون استفاده کرد (kV ۱۰–۱). میکروسکوپهایی که با اختلاف پتانسیل کمتری کار میکند، میکروسکوپ الکترونی روبشی اختلاف پتانسیل پایین (LVSEM)<sup>1</sup> نامیده میشوند. در این میکروسکوپها، نفوذ الکترونها به عمق ماده کم است و بخش قابل توجهی از الکترونهای ساطع شده از سطح نمونه الکترون ثانویه هستند.

در میکروسکوپهای الکترونی روبشی، مجموعهای از عدسیهای همگراکننده پرتو پرانرژی الکترونی را به باریکهای با قطر کم تبدیل میکنند. سیم پیچهای روبش گر مسیر حرکت این باریکه را با هدف روبش سطح نمونه کنترل میکنند. باریکهٔ الکترونی از عدسی شیئی عبور میکند و قطر آن به مقدار موردنیاز کاهش مییابد. درنهایت، پرتو با سطح نمونه برخورد میکند و سبب ایجاد انواع الکترونهای ثانویه و برگشتی و نیز، گسیل امواج الکترومغناطیسی، ازجمله پرتو ایکس مشخصه میشود. الکترونهای ثانویه و برگشتی حاصل از هر نقطهٔ روبش شده توسط آشکارسازهای اختصاصی آنها شمارش میشود و رایانه اطلاعات مربوط به آن نقطه را ثبت میکند. با پایان روبش سطح توسط پرتو الکترونی و ترکیب دادههای حاصل برای هر نقطه، تصویر نهایی حاصل میگردد. شکل ۳۴ با طرحی ساده نحوهٔ انجام روبش خطی سطح توسط پرتو الکترونی و ایجاد تصویر را نشان میدهد.



نکتهٔ مهم دربارهٔ فرایند تصویربرداری در میکروسکوپهای الکترونی روبشی این است که رفتار موجی الکترونها تا لحظهای که پرتو الکترونی به نمونه تابانده شود اهمیت دارد؛ زیرا پس از ساطعشدن الکترونهای ثانویه و برگشتی، از ماهیت موجی آنها برای ایجاد تصویر استفاده نمیشود و فارغ از جهت حرکت الکترونهای ثانویه یا برگشتی، تعداد آنها برای تعیین میزان روشنی یا تاریکی نقطهٔ روبششده شمرده میشود.

میکروسکوپهای الکترونی روبشی هم مانند میکروسکوپهای الکترونی عبوری، حساسیت بسیار زیادی به ارتعاش دارند. ازاینرو، نیاز است که همانند TEMها این میکروسکوپها در مکانی با حداقل ارتعاشات فیزیکی نصب شوند تا کیفیت تصاویر بهدستآمده کاهش نیابد.

۱۲۳

🔘 آمادهسازی نمونه برای تصویربرداری میکروسکوپ الکترونے روبشے

آمادهسازی نمونه برای تصویربرداری الکترونی روبشی، در مقایسه با آمادهسازی نمونه برای تصویربرداری الکترونی عبوری، بسیار سادهتر است. مهمترین دلیل این امر نبود محدودیت ضخامت برای نمونه برای تصویربرداری الکترونی روبشی است. در بیشتر میکروسکوپهای الکترونی روبشی این امکان وجود دارد که نمونههایی با ابعاد سانتیمتر به محفظهٔ تصویربرداری وارد شوند؛ در حالی که در میکروسکوپهای الکترونی عبوری، نمونه باید با ضخامت بسیار کم و بر روی توری با قطر mm ۳ تثبیت شود نمونهها برای تصویربرداری الکترونی عبوری، نمونه باید با ضخامت بسیار کم و بر معمولاً، از جنس آلومینیوماند تثبیت می شوند. اندازهٔ این پایهها حدود mon 1 / ما ت (شکل 70 - آ). تثبیت نمونه با استفاده از چسبهای رسانای مخصوص، که برای این هدف ساخته شده است، صورت می گیرد مانند چسب مس، نقره یا کربن. میکروسکوپهای الکترونی این قابلیت را دارند که بهطور همزمان چند نمونه را درون محفظهٔ تصویربرداری پذیرا باشند. جایگاهی که نگهدارندههای نمونه بر روی آن قرار داده می شوند با استفاده از یک موتور الکتریکی به دستور کاربر دستگاه، نمونهها را جابهجا می کند و امکان تصویربرداری از آنها را فراهم می سازد. شکل ۳۵ - ب تصویری از کربر ا



شکل ۳۵: (آ) تصویری از پایهٔ نگهدارندهٔ نمونه و (ب) محفظهٔ یک میکروسکوپ الکترونی روبشی که برای بارگذاری نمونه باز شده است

ازآنجاکه در تصویربرداری الکترونی روبشی، نمونهٔ ضخیم همواره در معرض تابش پرتو الکترونی قرار داد، در صورت نارسانا بودن نمونه، بار الکتریکی زیادی بر روی نمونه انباشت میشود. انباشت بار الکتریکی بر روی سطح نمونه دافعهٔ الکترومغناطیسی ایجاد می کند و باعث می گردد که پرتو الکترونی از مسیر اصلی خود منحرف شود. در چنین شرایطی، امکان تصویربرداری وجود نخواهد داشت. این مشکل با استفاده از پوشش دهی لایهای نازک با ضخامت چند نانومتر (معمولاً mm ۵) از مواد رسانا بر روی نمونه رفع میشود. بسته به نوع

نمونه و امکانات پوششدهی، میتوان از طلا (Au)، پلاتین (Pt)، کربن (C) و کروم (Cr) برای ایجاد پوشش رسانا بر روی نمونه استفاده کرد. مهمترین نکته دربارهٔ این پوشش این است که باید با کمترین ضخامت بیشترین رسانایی را ایجاد کند؛ همچنین، این پوشش نباید تأثیری بر روی شکل ظاهری سطح و درنتیجه، تصویر داشته باشد. شکل ۳۶ تصویری از یک لارو مگس را که برای تصویربرداری الکترونی روبشی با طلا پوشش داده شده است نشان میدهد.

شکل ۳۶: تصویری از یک لارو مگس که برای تصویربرداری الکترونی روبشی با طلا یوشش داده شده است بطالعه ريزساختار نانومواد

نکتهٔ مهم دیگری که باید دربارهٔ نمونهها مدنظر قرار گیرد این است که نمونه نباید مرطوب باشد یا ترکیبی داشته باشد که در شرایط خلاء از خود بخار متصاعد کند. چنین نمونههایی در شرایط خلاء، بهسرعت با پخش بخارات ستون الکترونی را آلوده میکنند که ممکن است به ادوات داخلی میکروسکوپ، ازجمله تفنگ الکترونی و آشکارسازها آسیب بزند. ازاینرو، چنین نمونههایی را پیش از پوشش دهی، در شرایطی خاص به نحوی که ساختار آنها آسیب نبیند و شکل ظاهریشان دچار تغییر نشود خشک میکنند. معمول ترین روش برای خشک کردن چنین نمونههایی، بهویژه برای نمونههای زیستی، فرایند خشک کردن انجمادی تحت خلاء<sup>1</sup> است.

## 💿 حالت های تصویربرداری میکروسکوپ الکترونے روبشے

میکروسکوپهای الکترونی روبشی یکی از پرطرفدارترین و پرکاربردترین ابزارهای مورداستفاده برای مطالعۀ انواع موادند. هزینۀ نسبی تصویربرداری پایین و امکان تهیۀ تصاویر با جزئیات عوارض سطحی از نمونه، این میکروسکوپها را به انتخاب اول بسیاری از مطالعات پژوهشی و صنعتی تبدیل کرده است. با توجه به امکان آشکارسازی دو نوع الکترون در میکروسکوپهای الکترونی روبشی، این میکروسکوپها دو حالت تصویربرداری دارند. همانند آنچه در میکروسکوپ الکترونی عبوری بیان شد، نام گذاری حالتهای تصویربرداری به نوع الکترون استفاده شده برای تصویربرداری بستگی دارد.

تصویر الکترون ثانویه: معمول ترین کاربرد میکروسکوپهای الکترونی روبشی برای مطالعهٔ مواد مختلف، تصویربرداری و عارضهنگاری<sup>۲</sup> از سطح مواد است. چنین تصاویری با استفاده از الکترونهای ثانویه، که از عمق بسیار کم نمونه (کمتر از nn ۱۰) ساطع میشوند، صورت می گیرد. این تصاویر توانایی نشاندادن جزئیات سطح ازجمله پستیوبلندیهای را دارند و دید سهبعدی از سطح ارائه میدهند. این امر مهمترین مزیت تصویرهای الکترونی ثانویه در مقایسه با تصاویر حاصل از میکروسکوپهای الکترونی عبوری است. تصاویر الکترونی ثانویه نه مرسومترین تصاویر تهیهشده با میکروسکوپهای الکترونی روبشیاند بلکه یکی از متداول ترین تصویرهای میکروسکوپ الکترونی برای مطالعهٔ مواد مختلف هم محسوب می شوند. اگر باریکهٔ الکترونی کیفیت مناسبی داشته باشد، می توان استفاده از میکروسکوپهای الکترونی روبشی به بزرگنمایی ۵۰۰ هزار بار و تفکیک nn ۱ دست یافت. چنین کیفیت تصویری معمولاً با استفاده از تفنگ الکترونی نشر میدانی مقدور است. با توجه به اینکه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی الکترون ثانویه (تعنگ الکترونی روبشی روبشی (SEM) مینامنده با میکروسکوپ الکترونی روبشی با استفاده مویر این معمولاً با ستفاده میکروسکوپ الکترونی روبشی روبشی (SEM) مینامنده با میکروسکوپ الکترونی روبشی الکترون ثانویه مویر از تفنگ الکترونی روبشی روبشی میده با میکروسکوپهای الکترونی روبشی الکترون ثانویه الکترون تانویه الکترونی مورد است. با توجه به اینکه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی الکترون شانویه موار با مویر روبشی الکترونی روبشی روبشی روبشی الکترونی میروسکوپ الکترونی روبشی الکترون مولی معرول معمول معرول معمول میکروسکوپ الکترونی روبشی روبشی روبشی میامند.

نکتهٔ موردتوجه این است که اگر بر روی بخشی از سطح نمونه تجمع بار الکتریکی وجود داشته باشد، باریکهٔ الکترونی در آن ناحیه منحرف خواهد شد. این امر موجب می گردد که آن ناحیه در تصویر بسیار روشن و براق دیده شود. این حالت در شرایطی پیش می آید که لایهٔ رسانا به خوبی بر روی نمونه پوشش داده نشده باشد؛ آسیب دیدن این لایه در حین جابه جایی و در اثر برهم کنش با باریکهٔ الکترونی دیگر، احتمال هایی است که باعث ایجاد چنین نقاط براقی می شود. مزیت های تصاویر الکترون ثانویه موجب شده است که امروزه، برخی از میکروسکوپهای الکترونی عبوری روبشی هم به آشکار ساز الکترون ثانویه موجب شده است که امروزه، برخی از میکروسکوپهای الکترونی عبوری روبشی هم به آشکار ساز الکترون ثانویه مجهز شوند. در این حالت تصویر به دست آمده یک تصویر میکروسکوپ الکترونی و برشی (SEM) است؛ با این تفاوت که با استفاده از پرتو الکترونی توانمندتری تهیه شده است و در نتیجه، بزر گ نمایی و تفکیک به تری دارد. شکل ۳۷ چند تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ثانویه از انواع نانومواد را نشان می دهد. این تصاویر به خوبی نشان دهندهٔ توانایی میکروسکوپهای الکترونی روبشی برای تهیهٔ تصاویر زیبا از انواع مواد است.

120

<sup>1-</sup> Vacuum freeze drying



شكل ٢٧: تصاوير ميكروسكوپ الكتروني روبشي الكترون ثانويه از انواع نانومواد با شكلهاي هندسي مختلف: (آ) كروي [٤٢]، (ب) هرمي [۵۳]، (پ) مكعبي [۵۴]، (ت) نانولوله [۵۵]، (ث) نانوميله [۵۶]، و (ج) نانوصفحه [۵۷]

**تصویر الکترون بر گشتی:** استفاده از الکترون های بر گشتی برای تصویربرداری با میکروسکوپ های الکترونی روبشی زیاد مرسوم نيست؛ زيرا الكترونهاي برگشتي از عمق بيشتري نسبت به الكترونهاي ثانويه به دست مي آيند. اين الكترونها دربردارندهٔ اطلاعات سطحی نیستند که بتوان با آن تصویر سهبعدی از جزئیات سطح تهیه کرد (تصویر موردعلاقهٔ بسیاری از پژوهشگران). تمایل برای مطالعهٔ عوارض سطحی نمونههای مختلف با استفاده از تصاویر سهبعدی حاصل از الکترونهای ثانویه موجب شده است که از الکترونهای بر گشتی کمتر برای تصویر سازی استفاده شود؛ بهنحوی که بسیاری از میکروسکوپهای الکترونی روبشی بدون آشکارساز الکترون بر گشتی به فروش میرسد. نکتهای که باید موردتوجه قرار گیرد این است که عدماقبال عمومی به تصاویر الکترونی روبشی برگشتی (BSE-SEM) دلیل بر ناکارآمدی این تصاویر نیست. الکترون های بر گشتی اطلاعات ار زشمندی از عمق نمونه (تا عمق ۱ µm) با خود به همراه دارند. شدت الکترون های برگشتي با عدد اتمي عناصري كه موجب پراكندگي الكترون مي شوند ارتباط مستقيمي دارد. بنابراين، برخي نواحي كه عناصر سنگین تری دارند یا آرایش اتمیشان به گونهای است که سبب ایجاد الکترونهای برگشتی بیشتری میشود (چیدمان اتمی فشرده)، در تصاویر حاصل از الکترونهای برگشتی روشن تر دیده می شوند.

اگر در تصاویر حاصل از الکترونهای ثانویه، مشکلاتی مانند انباشت بار ناشی از پوشش دهی نامناسب مادهٔ رسانا در بخشی از نمونه وجود نداشته باشد، امكان تشخيص نواحي مختلف نمونه براساس نوع عناصر تشكيل دهندهٔ آن وجود ندارد. شکل ۳۸ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی را در دو حالت الکترون ثانویه و برگشتی از یک ذرهٔ اکسید آهن بر روی ذرات کربن بی شکل نشان می دهد. همان طور که مشخص است، در تصویر الکترون ثانویه (شکل ۳۸- آ) هیچ تفاوت ظاهری میان ذرات وجود ندارد و از ظاهر تصویر نمی توان دربارهٔ جنس نمونه نظر داد؛ فقط بخشی هایی از تصویر به دلیل انباشت

(u) 5 µm  $(\tilde{I})$ 

(Ĩ) الكترون ثانويه و (ب) الكترون برگشتى [۴۹]

بار الکتریکی روشن تر دیده می شوند. در حالی که در تصوير الكترون برگشتی (شکل۳۸ - ب) ذرهٔ اکسید آهن بهخوبی وبا وضوح قابل مشاهده



مطالعه ريزساختار نانومواد 

است.

برایناساس، تصویرهای الکترونی برگشتی میتوانند بهراحتی تفاوت فازهای تشکیل دهندهٔ یک نمونه و نیز، تفاوت عناصر تشکیل دهنده را مشخص کنند. چنین تصاویری ابزار توانمندی برای مطالعهٔ مواد مرکب را که از چندین جزء عناصر تشکیل شدهاند، فراهم میکنند. شکل ۳۹ تصویر میکروسکوپ الکترونی در دو حالت ثانویه و برگشتی از سطح شکست تشکیل شدهاند، فراهم میکنند. شکل ۳۹ تصویر میکروسکوپ الکترونی در دو حالت ثانویه و برگشتی از سطح شکست یک داروی خوراکی را نشان میدهد. مواد دارویی درون زمینهای از جنس کلسیم پستینت<sup>1</sup> پخش شدهاند. تصویر محاصل از الکترونهای ثانویه و برگشتی از سطح شکست حاصل از الکترونهای ثانویه (شکل ۳۹– آ) فقط نشان دهندهٔ پستیوبلندیها و شکل ظاهری سطح دارو در محل شکست است و با استفاده از آن نمیتوان دربارهٔ نحوهٔ توزیع دارو در زمینه قضاوت کرد. تصویر الکترونهای برگشتی از شکل ۳۹– ب) به خوبی تفاوت مواد تشکیل دهنده را نشان میدهد. از آن نمیتوان دربارهٔ نحوهٔ توزیع دارو در زمینه قضاوت کرد. تصویر الکترونهای برگشتی از شکل ۳۹– آ) فقط نشان دهندهٔ پستیوبلندیها و شکل ظاهری سطح دارو در محل شکست است و با استفاده از آن نمیتوان دربارهٔ نحوهٔ توزیع دارو در زمینه قضاوت کرد. تصویر الکترونهای برگشتی (شکل ۳۹– ب) به خوبی تفاوت مواد تشکیل دهنده را نشان میدهد. از آنجاکه کلسیم موجود در مادهٔ زمینه سنگین تر در شکل ۱۶۹– ب) به خوبی تفاوت مواد تشکیل دهنده را نشان میدهد. از آنجاکه کلسیم موجود در مادهٔ زمینه سنگین تر دیده میشود. مادهٔ داروی پخش شده در زمینه با ستی زمینهٔ کلسیمی که نقش حامل دارو را بر عهده دارد روشن دیده میشود. مادهٔ دارویی درون این زمینه با رنگ خاکستری و حفرههایی که در دارو وجود دارد و هیچ الکترونی از آن برنگشته است تاریک دیده می شوند.



ـکل ۲۹: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی یک مادهٔ دارویی مرکب در دو حالت (ا) الکترون ثانویه و (ب) الکترون برگشتی [۵۸]

در ادامه، چند نکتهٔ مهم دربارهٔ تصاویر میکروسکوپ الکترونی بیان خواهیم کرد. نکتهٔ نخست این است که در این تصاویر، رنگ مفهومی ندارد؛ زیرا این تصاویر حاصل اندازه گیری شدت الکترون دریافتی توسط آشکارسازها هستند. بااین حال، در برخی موارد تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، به ویژه تصاویری را که از موجودات زنده تهیه می شوند، با استفاده از نرمافزارهای خاص رنگ آمیزی میکنند. شکل ۴۰ چند نمونه از این تصاویر را نشان می دهد.



ثصل چہار*ج* مطالعہ ریزساختار نانومواد

مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك

۱۲۷

نکتهٔ دیگر دربارهٔ تصاویر میکروسکوپ الکترونی این است که معمولاً، هنگام بررسی یک تصویر صحبتی از مقدار بزرگنمایی آن نمی شود؛ زیرا بررسی یک تصویر و اقدام به محاسبهٔ اندازهٔ اجزای آن با در نظر گرفتن مقدار بزرگنمایی کاری وقتگیر و احتمالاً، ناخوشایند است. راهکار سادهتر در این زمینه استفاده از خط اندازه<sup>۱</sup> در کنار تصویر است که معمولاً، طول نسبی آن بر روی خط بیان می شود. این خط کمک می کند که به سرعت و بدون نیاز به مویر HAADF-STEM یک نانوذرهٔ آلیاژی<sup>۲</sup> پلاتین – پالادیم (PtPd) را نشان می دهد. طول خط اندازهٔ این تصویر برا بر mr ۲ است. با مشاهدهٔ این نشان می دهد. طول خط اندازهٔ این تصویر برابر mn ۲ است. با مشاهدهٔ این مواردی مانند اندازهٔ ذره (تقریباً m ۳ × mr) و فاصلهٔ میان اتمها (از مرتبهٔ



میدان تاریک حلقوی زاویه بالااز یک نانوذرهٔ آلیاژی پلاتین – پالادیم [۶۰]

دهم نانومتر). در این شکل فاصلهٔ صفحات اتمی در راستاهای بلوری مختلف با استفاده از طول خط اندازه تعیین شده است. فارغ از مفاهیم مربوط به تصویر برداری الکترونی، نظم بلوری در این نمونه به خوبی قابل مشاهده است و به درک مفهوم بلور کمک می کند. این تصویر همچنین، نشان دهندهٔ توانایی بسیار عالی میکروسکوپهای الکترونی عبوری روبشی (STEM) برای تهیهٔ تصویر با بزرگی از مرتبهٔ چند میلیون با وضوح بسیار بالا در حالت تصویربرداری میدان تاریک حلقوی زاویه بالا (HAADF) است.

با استفاده از خط اندازه میتوان اندازهٔ کل اجزای تصویر را تعیین کرد. یکی از موارد پرکاربرد تصاویر میکروسکوپ الکترونی، تعیین متوسط اندازهٔ ذرات در یک نمونه است؛ بهاینترتیب که با استفاده از چند تصویر اندازهٔ تمام اجزا تعیین میشود. در ادامه، میتوان اندازهٔ متوسط اجزا در نمونه و نیز، منحنی توزیع اندازهٔ نمونه را رسم کرد. شکل ۴۲ نشاندهندهٔ دو تصویر الکترونی عبوری روبشی و منحنیهای توزیع اندازهٔ ذرات حاصل از آنها را نشان میدهد.



1- Scale bar

۲- آلیاژ (alloy) به یک مادهی جامد حاصل از ترکیب از دو فلز یا چند فلز که بهصورت یکنواخت با هم مخلوط شدهاند گفته می شود.

ستت چہرہے مطالعہ ریزساختار نانومواد

# 🚸 👌 مطالعه ترکیب شیمیایی نمونهها با استفاده از میکروسکوپهای الکترونی

در اثر برهم کنش غیرالاستیک پرتو الکترون فرودی با ابر الکترونی اتمهای نمونهٔ موردمطالعه، پرتوهای ایکس، موسوم به پرتو ایکس مشخصه، تولید می شود. این پدیده با گسیل یک الکترون ثانویه و جایگزینی الکترون خارج شده با الکترونی از ترازهای انرژی بالاتر انجام می شود (شکل ۱۳–پ و ت). الکترونی که در تراز انرژی بالاتر قرار دارد دارای انرژی بیشتری است، ازاینرو، انرژی مازاد آن هم زمان با انتقال به تراز پایین تر به شکل یک فوتون منتشر می شود. انرژی این فوتون برابر اختلاف انرژی این دو تراز انرژی است. از آنجاکه هر اتم ساختار الکترونیکی خاص خود را دارد، فاصلهٔ ترازهای انرژی برای هر عنصر مقداری کاملاً مشخص است؛ به نموی که می توان این فاصله های انرژی را به عنوان اثر انگست هر عنصری در نظر گرفت و با سنجش آن به نوع عنصر پی برد. هر پرتو که از گذار الکترونی بین ترازهای مختلف یک اتم منتشر شود، انرژی و درنتیجه، طول موجی خواهد داشت که مقداری کاملاً اختصاصی برای آن عنصر است. چنین پرتوهایی را پرتو مشخصه می نامند.

در تولید الکترون ثانویه، الکترون از لایههای درونی ابر الکترونی خارج میشود. اختلاف انرژی ترازهای داخلی در یک اتم با ترازهای بالاتر بسیار زیاد است؛ بهنحوی که فوتون گسیل شده یک فوتون پرانرژی خواهد بود که طول موج آن در محدودهٔ طول موج پرتو ایکس قرار دارد. بنابراین، همواره همزمان با تولید یک الکترون ثانویه، یک فوتون پرانرژی ایکس هم منتشر می شود. از آنجا که الکترون های ثانویه کم انرژی هستند، تقریباً تمام الکترون های ثانویه، که در عمقی بیش از mn ۲۰ تولید شده اند، درون ماده پراکنده می شوند و انرژی خود را از دست می دهند و نمی توانند از ماده خارج شوند. پرتو ایکس توان نفوذ بسیار بالایی در انواع مواد دارد؛ بنابراین، پرتو ایکس مشخصهٔ تولید شده می توانند از عمقی حدود سلا ۲ خود را به سطح ماده برساند و وارد محیط خلاء شود. می توان با آشکار سازی پرتو ایکس مشخصهٔ گسیل شده در حین تابش پرتو الکترونی به نمونه و اندازه گیری انرژی فوتون های آن، نوع عناصر تشکیل دهندهٔ نمونه را مشخص کرد. این امر موجب می گردد که انواع میکروسکوپهای الکترونی (هر دو نوع روبشی و عبوری)، در صورتی که به آشکار ساز پرتو ایکس مجهز باشند، بتوانند همزمان با تصویر داری از نمونه، ترکیب های شیمیایی و عناصر تشکیل دهندهٔ نمونه را هم مشخص کند.

یکی از راههای ایجاد پرتو ایکس، کاهش سطح انرژی یک الکترون پرانرژی است. الکترونهایی که از طریق تفنگ الکترونی و آند شتاب گرفتهاند انرژی بسیار بالایی دارند. این الکترونها با نزدیک شدن به نمونه، تحت تأثیر دافعهٔ ابر الکترونی اتمهای ماده بخشی از سرعت خود را از دست میدهند. این کاهش سرعت به معنای کاهش انرژی الکترون است؛ درنتیجهٔ این پدیده الکترونهای فرودی هم به دلیل کاهش انرژی، از خود پرتو ایکس گسیل میکنند. این گسیل انرژی به صورت طیف پیوسته ای از پرتو ایکس صورت می گیرد. هنگام تاباندن پرتو الکترونی به یک نمونه، اگر شدت



پرتوهای ایکس گسیل شده بهعنوان تابعی از انرژی این پرتوها رسم شوند (شکل ۴۳) مشاهده می گردد که همواره و در تمامی انرژیها، پرتو ایکس از نمونه ساطع میشود. بااینوجود در برخی انرژیها شدت پرتو ایکس افزایش ناگهانی دارد. پرتوی که با شدت کم و در همهٔ طول موجها گسیل می شود را پرتو ترمزی و پرتوی که با اختلاف انرژی بسیار زیاد به پرتو پیوسته مشاهده می شود را پرتو مشخصه می نامند. وجود پرتو ایکس یک یک عنصر در منحنی توزیع انرژی پرتو ایکس یک نمونه نشان دهندهٔ حضور آن عنصر در آن نمونه است.

۱- مفهوم پرتو ترمزی (braking radiation) در ادامهٔ همین فصل و در بخش تولید پرتو ایکس برای کاربردهای مختلف بهطور کامل توضیح داده شده است.

تا زمانی که پرتو الکترونی به سطح نمونه تابانده میشود، هر دو گروه پرتو ایکس ترمزی و مشخصه از نمونه ساطع می شوند؛ با توجه به این نکته نیاز است برای جلوگیری از ضررهای این پرتو به کاربر، از خروج این پرتوها از ستون الکترونی به محیط بیرون جلوگیری شود. ازاینرو، معمولاً لایهای از جنس سرب در ساخت دیوارهٔ ستون الکترونی به کار برده می شود تا پرتوهای ایکس تولیدی را جذب کند.

# 🔘 آشکارسازی پرتوهای ایکس

بهطورکلی، هر آشکارسازی که برای سنجش شدت یا طولموج امواج الکترومغناطیسی به کار برده می شود طیفسنج ا مینامند. طیفسنجهای پر تو ایکس مورداستفاده در میکروسکوپهای الکترونی باید برای سنجش انرژی پر توهای ایکس دریافتی از نمونه دقت و حساسیت بسیار بالایی داشته باشند. این امر موجب می شود که ساختاری پیچیده و قیمت به نسبت بالایی داشته باشند. دو نوع آشکارساز پرتو ایکس بر روی میکروسکوپهای الکترونی نصب میشود. مبنای عملکرد نوع اول، که متداول تر است، سنجش انرژی فوتون های پرتو ایکس است؛ درحالی که نوع دوم از این آشکارسازها بر اساس سنجش طول موج پرتو ایکس کار می کند.



**طیفسنج توزیع انرژی:** طیفسنج توزیع انرژی متداول ترین طيفسنج بهكاربردهشده در انواع ميكروسكوپهاى الكتروني است. به بیان ساده، این آشکارسازها یا طیفسنجها قطعههایی نيمهرسانا دارند كه با تابش پرتو ايكس، زوج الكترون - حفره در آنها ایجاد می شود و درنتیجه، دارای یک جریان الکتریکی می شوند. این جریان الکتریکی با شدت و انرژی فوتونهای ایکس رسیده به آشکارساز متناسب است. با اندازه گیری دقیق این جریان الکتریکی، شدت و انرژی پرتو ایکس ساطعشده 🛛 شکل ۴۴:طرحی ساده از طیفسنج توزیع انرژی خنک شونده بانیتروژن مایع

از نمونه آشکار میشود. چنین آشکارسازهایی، که توزیع انرژی پرتو ایکس دریافتی و شدت پرتو را اندازه گیری میکنند، طیفسنج توزیع انرژی (EDS)<sup>۲</sup> نامیده میشوند. شکل ۴۴ طرحی ساده از این نوع طیفسنج نشان میدهد.

طیفسنجهای متداول توزیع انرژی پرتو ایکس باید در دمای پایین به کار برده شوند. این کار از ایجاد جریان الکتریکی در اثر تحریک حرارتی محیط در قطعات نیمهرسانای آشکارساز جلوگیری میکند. این آشکارسازها را با استفاده از نیتروژن مایع (در دمای <sup>°</sup>C ۱۹۶ -) خنک میکنند؛ بهاینترتیب که میلهای فلزی به بدنهٔ آشکارساز نیمهرسانا متصل می شود. انتهای دیگر این میله در نیتروژن مایع قرار دارد و موجب خنک شدن آشکار ساز می شود. میکروسکوپهای مجهز به این نوع آشکارسازها با منبع بزرگ نیتروژن مایعی که دارند بهراحتی، قابل تشخیصاند (شکل ۴۵). اخیراً، انواع جدیدی از آشکارسازهای توزیع انرژی وارد بازار شده است که به خنکسازی با نیتروژن مایع نیاز ندارد.

**طیفسنج توزیع طول موج:** نوع دیگر طیفسنج مور داستفاده در میکروسکوپهای الکترونی، طیفسنج توزیع طول موج (WDS) ً است. این نوع طیفسنج ساختاری پیچیدهتر و قیمت بیشتری از طیفسنجهای توزیع انرژی دارد. اساس کار این نوع طیفسنج تاباندن پرتو ایکس به یک قطعهٔ بلوری و بازتاب پرتو از این بلور است. در این فرایند، هر فوتونی با توجه به طول موجى كه دارد با زاويهٔ خاصى منعكس مىشود .

۱۳۰

بطالعه ريزساختار نانومواد

<sup>1-</sup> Spectrometer

<sup>2-</sup> Energy dispersive spectrometer

<sup>3-</sup> Wavelength dispersive spectrometer

۴- توضيح ارائهشده يک توضيح علمي و دقيق براي پديده نيست و فقط براي توصيف أنچه در اين نوع طيفنگارها رخ ميدهد بيان شده است. اين پديده پراش نام دارد که بهطورکامل و دقیق در ادامهٔ این فصل و در بخش پراش پرتو ایکس توضیح داده شده است.

ازاینرو پرتو ایکس اولیه، که ترکیبی از طولموجهای مختلف بود، به طولموجهای سازندهٔ آن، که هر کدام در زاویهای خاص منعکس شدهاند، تفکیک میشود. این زاویه ارتباط مستقیمی با طولموج هر پرتو و بلور استفادهشده دارد. بنابراین، هر طولموج زاویهٔ انعکاس خاص خود را دارد. در ادامه، یک آشکارساز پرتو ایکس، که با استفاده از یک موتور الکتریکی در مسیر دایرهای حرکت میکند (شکل ۴۶)، شدت هر یک از این طولموجها را میسنجد و درنهایت، از طریق اطلاعات بهدستآمده طیف پرتو ایکس ساطعشده از نمونه بهدست میآید.





با توجه به اینکه پرتوایکس داخل محفظهٔ طیفسنج منعکس میشود و به آشکارساز میرسد، داخل این محفظه باید خلاء باشد تا از جذب پرتو ایکس جلوگیری کند. ممکن است این نوع طیفسنجها بهصورت یکپارچه با بدنهٔ اصلی دستگاه ساخته شود و یا بهصورت قطعهای جداگانه بر روی آن نصب گردد. در موارد بسیار، میکروسکوپهای الکترونی به هر دو نوع طیفسنج مجهز میشوند. شکل ۴۷ تصویری از یک طیفسنج توزیع انرژی بدون نیاز به خنک کردن، یک طیفسنج توزیع طولموج و یک میکروسکوپ الکترونی روبشی را که به هر دوی این آشکارسازها مجهز است نشان میدهد.

ثصل چہارج مطالعہ ریزساختار نانومواد

مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك



شکل ۴۲: تصویری از (آ) یک طیفسنج توزیع انرژی بدون نیاز به خنک کردن، (ب) یک طیفسنج توزیع طولموج و (پ) یک میکروسکوپ الکترونی روبشی که به هر دوی این آشکارسازها مجهز است

درواقع، دو نوع طیفسنج معرفیشده یک کار را انجام میدهند. با اینوجود، تفاوت ساختاری و نحوهٔ آشکارسازی پرتو ایکس توسط این دو نوع طیفسنج موجب میشود کیفیت نتایج حاصل از آنها و قیمتشان متفاوت باشد. طیفسنجهای توزیع الکترون قیمت بیشتری نسبت به طیفسنج توزیع انرژی دارند. مزیت دیگری که طیفسنج توزیع انرژی، در مقایسه با طیفسنج توزیع طول موج دارد، سرعت بالای داده گیری آن است. درنهایت، این طیفسنجها محدودهٔ انرژی پرتوهای ایکس مشخصهٔ عناصر مختلف را به طورکامل پوشش میدهند.

نخستین برتری طیفسنجهای توزیع طولموج به طیفسنجهای انرژی، دقت و تفکیک پذیری بسیار بالای آنهاست؛ بهاین ترتیب که طیفسنجهای توزیع طولموج می توانند دو طولموج نزدیک به هم را تفکیک کنند؛ درحالی که طیفسنجهای توزیع انرژی در بسیاری از موارد نمی توانند فوتونهایی که انرژی نزدیک به هم دارند را تفکیک کنند. شکل ۴۸ طیف EDS و WDS حاصل برای یک نمونهٔ حاوی دو عنصر نیتروژن و تیتانیوم را نشان می دهد. از آنجاکه پر تو مشخصهٔ ایکس این دو عنصر انرژی نزدیک به هم دارند، در طیف حاصل از طیفسنج توزیع انرژی پیک این دو عنصر با هم همپوشانی دارند؛ در حالی که طیفسنج توزیع طولموج هر دو را به خوبی تفکیک می کند.



دیگر مزیت اساسی طیفسنجهای توزیع طول موج، حساسیت بالای آنها به غلظت پایین مواد است. به این صورت که با کاهش غلظت یک عنصر در نمونه، شدت پرتو ایکس مربوط به آن نیز کمتر می شود. طیفسنجهای توزیع طول موج با توانایی آشکار سازی حدود ۱۰ برابر بیشتر از طیفسنجهای توزیع انرژی، می توانند به راحتی موادی را که به مقدار جزئی در نمونه حضور دارند تشخیص دهند. آخرین مزیت این طیفسنجها، تکرارپذیری نتایج حاصل از آنهاست؛ به این معنى كه براى يك نمونهٔ مشخص، با تكرار اندازه گيرى نتيجهٔ حاصل از طيفسنجهاى توزيع طول موج تغيير چندانى نخواهد داشت؛ درحالی که نتایج حاصل از طیفسنجهای توزیع انرژی همواره، با اندکی اختلاف همراه است. با وجود تمام مزيتهاي ذكرشده، طيفسنجهاي توزيع طولموج مشكلات عمدهاي دارند؛ نخست اينكه به دليل وجود اجزای مکانیکی، فرایند اندازه گیری در این طیفسنجها به نسبت زمانبر است؛ در حالی که طیفسنجهای توزیع انرژی با سرعت بالايي كار ميكنند. مشكل ديگر اين طيفسنجها اين است كه نمي توانند با استفاده از يك بلور بازهٔ كاملي از طیفهای مشخصه را پوشش دهند؛ ازاینرو ممکن است به تعویض بلور نیاز داشته باشند. این امر موجب می شود در میکروسکوپهایی که تعیین ترکیب شیمیایی برای کاربران آن از اهمیت بالایی برخوردار است، بهطور همزمان، هر دو طيفسنج EDS و WDS وجود داشته باشد (شكل ۴۷-پ).



توليد يرتو ايكس مشخصه هنگام تابش يرتو الكتروني به مواد این امکان را فراهم می آورد که بتوانیم در صورت وجود طیفسنجهای پرتو ایکس بر روی میکروسکوپ الكتروني، تركيب شيميايي نمونه را هم بررسي كنيم. اين فرایند، فارغ از نوع طیفسنج مورداستفاده، طیفنگاری توزیع انرژی پرتوا یکس (EDX) نامیده می شود. در یک طیفنگاری پرتو ایکس نمودار شدت پرتو ایکس ساطعشده از نمونه بهعنوان تابعی از انرژی رسم می شود. منحنى دراصطلاح، طيف توزيع انرژى پرتو ايكس ناميده می شود و در برخی انرژی ها منحنی به صورت قله های تیز مشاهده می گردد. براساس اطلاعات موجود در

بانکهای اطلاعاتی عناصر، میتوان با تطبیق انرژی این قلهها نوع عنصر موجود را تشخیص داد (شکل ۴۹). بسته به نوع میکروسکوپ استفادهشده برای طیفنگاری انرژی پرتو ایکس، پرتو ایکس را بر روی سطح مشخصی از نمونه روبش میکنند

(ميكروسكوپهاي روبشي) يا پرتو را بهصورت غيرمتمر كز به نمونه مي تابانند (ميكروسكوپ الكتروني عبوري معمولي). باید به این نکته توجه کرد که عناصر مختلف، بسته به تعداد لایههای الکترونی که دارند، میتوانند گذارهای مختلف بین ترازی داشته باشند و درنتیجه، دارای چندین پرتو ایکس مشخصه باشند. تعداد این پرتوها با افزایش عدد اتمی عنصر افزایش می یابد؛ برای مثال، همان طور که در شکل ۴۹ نشان داده شد، در محدودهٔ انرژی ۱۰ keV – ۰ برای مس و قلع سه پرتو مشخصه وجود دارد و برای طلا دو پرتو. البته فارغ از اینکه طیفنگاری با استفاده از طیفسنج توزیع انرژی یا طول موج صورت گرفته باشد، منحنی نهایی برحسب انرژی رسم خواهد شد. می توان با استفاده از طیف توزیع انرژی پرتو ایکس نسبت عناصر موجود در یک نمونه را تعیین کرد. البته این امر با نحوهٔ آمادهسازی نمونه، یکنواختی نمونه و درنهایت، کیفیت آشکارسازی و نوع طیفسنج مورداستفاده ارتباط مستقیمی دارد؛ بهاینصورت که برای همه عناصر یک پرتو ایکس مشخصهٔ اصلی وجود دارد که همواره نسبت به سایر پرتوهای مشخصه (در صورت وجود) شدت بیشتری دارد. نسبت شدت این پرتو به مجموع شدت پرتو مشخصهٔ اصلی کلیهٔ عناصر موجود در طیف نشان برابر نسبت این عنصر به سایر عناصر در نمونه است.

مطالعه ريزساختار نانومواد



محسال ويهارم



💿 تهیه تصویرنگاشت عنصری

یکی از قابلیتهای جالب استفاده از طیفسنجی پرتو ایکس در میکروسکوپهای الکترونی مجهز به روبش گر الکترونی، تهیهٔ تصاویری موسوم به نگاشت عنصری<sup>۱</sup> است. برای تهیهٔ این تصاویر، پس از انتخاب ناحیهٔ موردنظر برای تصویربرداری و تهیهٔ تصویر باکیفیت از آن، ناحیه را چندینبار با پرتو الکترونی روبش میکنند و در این حین، انرژی پرتوهای ایکس ساطعشده را با استفاده از طیفسنج اندازه میگیرند. در این فرایند از پرتو ایکس حاصل برای رسم طیف توزیع انرژی استفاده نمیکنند بلکه رایانهٔ میکروسکوپ با پردازش دادههای بهدستآمده از هر نقطه، عناصر موجود در آن نقطه را تعیین و در تصویر رنگی خاصی محل آن عنصر را مشخص میکند. حاصل این نوع تصویربرداری، نقشهای از توزیع عناصر مختلف در ناحیهٔ تصویربرداری شده است (شکل ۵۰).

همانطور که در شکل ۵۰ مشاهده میشود، نگاشت عنصری این امکان را فراهم میآورد که بتوان بهطور دقیق، از نحوهٔ توزیع عناصر مختلف در یک نمونه آگاه شد.



شکل ۵۰: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی و نگاشت عنصری ناحیهٔ مشخص شده از یک نانوساختار تشکیل شده از ۶ عنصر مختلف [۶۴]

# 🔅 \_ تصویربرداری از میکروسکوپهای پروبی روبشی

آیا تا به حال فرد روشندلی را درحال مطالعهٔ کتاب با خط بریل<sup>۲</sup> دیدهاید؟ او با حرکتدادن انگشت خود روی صفحات کتاب، از طریق حس لامسهٔ خود نقاط برجستهای را که با الگوی خاص کنار هم قرار گرفتهاند تشخیص میدهد (شکل ۵۱). این فرایند برای تمام نقاط صفحه تکرار می گردد و درنهایت، فرد نابینا موفق می شود محتوای آن صفحه را بخواند. در این میان، نکتهٔ مهم نسبت اندازهٔ نقاط برجسته و نوک انگشتان

فرد است. اگر این نقاط بسیار کوچکتر از نوک انگشتان فرد باشند، دیگر امکان تشخیص و لمس این نقاط وجود ندارد و درنتیجه، خواندن آن برای فرد مقدور نخواهد بود. ازاینرو، تناسب میان اندازه و بزرگی نقاط نوک انگشتان فرد مطالعهکننده شرطی مهم برای امکانپذیری خواندن خط بریل به شمار میرود.

1- Elemental mapping

شکل ۵۱: کتابی با خط بریل و دستان فرد نابینا در حال مطالعه کتاب

2- Braille

مطالعه ريزساختار نانومواا

حال فرض کنید چه اتفاقی میافتاد اگر انگشتان دستمان بهقدری کوچک و حس لامسهمان بهقدری حساس بود که با کشیدنشان روی سطح مواد مختلف، کوچک ترین پستیوبلندیهای سطح ماده، حتی موادی که ناشی از وجود یا عدموجود تک اتمها هستند، را لمس و حس میکردیم. این امکان در واقعیت برای ما وجود ندارد اما دستگاههایی ساخته شدهاند که با سازوکار مشابه این امکان را برایمان فراهم میکنند. اساس عمکرد میکروسکوپهای پروبی روبشی (SPM)<sup>1</sup> مانند خواندن خط بریل است. میکروسکوپهای پروبی روبشی با استفاده از ابزاری موسوم به پروب یا سنجه و تکیه بر برهمکنشهای رخداده میان پروب و سطح مورد مطالعه، تصویر دقیقی از سطح به ما ارائه میدهند. هنگام تصویربرداری از سطح، پروب این میکروسکوپها از یک نقطه شروع میکند و با حرکت در دو راستای عمود بر هم، کل سطح مورد مطالعه را میپیماید و معیاری از ارتفاع هر نقطه از سطح به ما میدهد. درنهایت، میتوان با انتقال این اطلاعات به رایانه و پردازش آن تصویری دو یا سهبعدی از سطح به ما میدهد. درنهایت، میتوان با انتقال این

پروب میکروسکوپهای پروبی روبشی، بسته به نوع میکروسکوپها، متفاوت است؛ تمامی پروبها بهطورمعمول، یک سوزن نوک تیز هستند که بسته به نوع میکروسکوپ و فرایند تصویربرداری، مشخصههای خاص خود را دارند. سوزن و نگهدارندهٔ آن، آشکارساز<sup>۲</sup> و سامانهٔ بازخورد<sup>۳</sup> بخشهای اصلی سازندهٔ یک میکروسکوپ پروبی روبشی بهشمار میروند (شکل ۵۲). آنچه تعیینکنندهٔ نوع میکروسکوپ پروبی روبشی است، نوع برهمکنش موجود میان پروب و سطح نمونهٔ موردمطالعه است. دو نوع اصلی و متداول میکروسکوپهای پروبی روبشی طی فرایند پیمایش سطح، با استفاده از نیروهای کوتاهبرد اتمی یا بهاختصار، نیروی اتمی<sup>1</sup> یا جریان تونلی<sup>6</sup> با سطح نمونه برهمکنش میکند و سنجش فاصلهٔ نوک<sup>7</sup> سوزن با سطح را برای دستگاه امکان پذیر می سازد. میکروسکوپها با اندازه گیری عامل برهم کنش میکند و سنجش فاصلهٔ نوک<sup>7</sup> سوزن سامانهٔ بازخورد، فاصلهٔ نوک سوزن با سطح نمونه را اندازه گیری می کند؛ به این ترتیب، پستی وبلندی های سطح نمونه از شکار می شوند. با توجه به ابعاد سوزن و نوک بسیار تیز آن (در شرایط ایدهآل نوک سوزن فقط از یک اتم ساخته شده است)، این میکروسکوپها می توانند کوچک ترین پستی وبلندی ها در حد نانومتر و کمتر از آن را بررسی کنند. برای تغییر میکان سوزن با دقت مناسب در هر سه جهت اصلی (طول، عرض، ار تفاع) از مواد و کمتر از آن را بررسی کند. برای تغییر



- 1- Scanning probe microscope
- 2- Detector
- 3- Feedback loop
- 4- Atomic force
- 5- Tunneling current
- 6- Tip

فصل چہارم مطالعہ ریزساختار نانومواد

مفاهيم اوليه فناوري نانو و كاربردهاي آن در فيزيك

۱۳۵

میکروسکوپهای پروبی روبشی براساس نوع برهمکنشی که با آن از سطح نمونه تصویربرداری میکنند دستهبندی می شوند. میکروسکوپ نیروی اتمی(AFM) و میکروسکوپ تونلی روبشی(STM) دو نوع اصلی میکروسکوپهای پروبی روبشیاند. سازوکار این دو میکروسکوپ بسیار نزدیک به هم است اما نیروهایی که هرکدام از آنها، برای تشخیص فاصلهٔ بین نوک سوزن و سطح نمونه از آن استفاده می کنند متفاوت است.

## 回 میکروسکوپ تونلے روبشے

در سال ۱۹۸۱ میلادی، نخستین گام توسعهٔ میکروسکوپهای پروبی روبشی با اختراع میکروسکوپ تونلی روبشی برداشته شد. نخستینبار دو پژوهشگر به نامهای گرد بینیگ (آلمانی) و هنریک روهر (سوئیسی) در آزمایشگاه تحقيقاتی IBM شهر زوريخ اين ميكروسكوپ را ساختند. اين اختراع چنان چشمگير و با اهميت بود كه اين دو پژوهشگر در سال ۱۹۸۶ میلادی، به خاطر آن برندهٔ جایزهٔ نوبل فیزیک شدند.

## 💿 تونل زنے کوانتومے و جریان الکتریکے تونلے

همانطور که از نام میکروسکوپ تونلی روبشی ییدا ست، این میکروسکوپ برای برهم کنش با سطح نمونه و محاسبه فاصله بین آنها از جریان تونلی ايجادشده بين نوک سوزن ميکروسکوپ و سطح نمونه استفاده مىكند. پديدهٔ تونلزنى پديدهاى كوانتومى است. براساس نظرية كوانتوم و اصل عدم قطعيت"، نمى توان محل حضور الكترون را به طورقطعی مشخص کرد و در بهترین حالت، فقط

میتوان احتمال حضور الکترون را در اتم و اطراف آن محاسبه کرد. به همین دلیل در مدلی که برای توصیف ساختار اتم ارائه شد، از اوربیتال و احتمال حضور الکترون در آن سخن گفته شد نه مکانی دقیق برای آن. براین اساس، احتمال بسیار کمی وجود دارد که الکترونهای دو سطح بسیار نزدیک به هم از فاصلهٔ بین این دو سطح و سد انرژی آن عبور کنند و به سطح دیگر برسند. به این پدیده تونلزنی کوانتومی کم گفته می شود. می دانیم که الکترون ها به طور همزمان، دارای ماهیت ذرهای و موجی هستند. پدیدهٔ تونلزنی ناشی از رفتار موجی الکترونهاست.

برای درک پدیدهٔ تونلزنی میتوان از مثالی ساده کمک گرفت. فرض کنید میخواهید توپی را از روی دیواری با ارتفاع مشخص عبور دهید. تا زمانی که به این توپ ضربهای با نیرو و زاویهٔ مناسب وارد نکنید، توپ توان عبور از دیوار را نخواهد داشت. این دیوار یک سد انرژی در برابر توپ است و آموختههای ما از فیزیک کلاسیک می گوید که عبور از این سد بدون داشتن انرژی کافی ناممکن است. مکانیک کوانتوم دیدگاهی متفاوت دربارهٔ این مسأله دارد؛ براساس ديدگاه كوانتومي، اگر ضخامت اين سد به حد كافي نازک يا اندزهٔ آن كوتاه باشد، اين توپ مي تواند با احتمال مشخصي (هر قدر هم کم) بدون بهدستآوردن انرژی موردنیاز برای غلبه بر این سد انرژی از دیوار عبور کند. چنین پدیدهای که

- 2- Scanning tunneling microscope
- 3- Gerd Binnig
- 4- Heinrich Rohrer
- 5- Uncertainty principle
- 6- Quantum tunneling

شكل ۵۳: طرحي از فرايند تونلزني كوانتومي [۶۵]



مطالعه ريزساختار نانومواد

<sup>1-</sup> Atomic force microscope

در آن ذره بدون کسب انرژی موردنیاز، به سد انرژی پیشروی خود غلبه میکند و از آن میگذرد، تونلزنی کوانتومی گفته میشود. چنین رفتارهای در دنیایی که مکانیک کوانتوم بر آن حکمفرماست کاملاً طبیعی است و همواره، در حال رخ دادن است. شکل ۵۳ طرحی از دو مسیر پیشروی یک ذره برای گذر از سد انرژی را ترسیم میکند.

رخدادن تونلزنی کوانتومی برای هر ذرهٔ کوانتومی، ازجمله الکترون، ممکن است. جریان الکتریکی که در اثر تونلزنی الکترونها از یک نقطه با پتانسیل الکتریکی بالاتر به نقطهای با پتانسیل پایین تر جاری می شود را جریان تونلی می نامند. باید به این نکتهٔ مهم توجه کرد که این پدیده با پدیدههای دیگر، مثل قوس الکتریکی یا صاعقه، بسیار متفاوت است. قوس الکتریکی (جرقه الکتریکی) با مبانی فیزیک کلاسیک کاملاً توجیه پذیر است، اما تونلزنی کوانتومی پدیده ای کوانتومی است و به احتمال حضور الکترون در مکان های مختلف مرتبط است و نمی تواند براساس فیزیک کلاسیک توجیه شود. در قوس الکتریکی یا صاعقه، مولکول های بخش عایق، که بین دو الکترود قرار گرفته اند، در اثر نیروی بسیار قوی الکتریکی و میدان الکتریکی یا صاعقه، مولکول های بخش عایق، که بین دو الکترود قرار گرفته اند، در اثر نیروی بسیار توجیه شود. در قوس الکتریکی یا صاعقه، مولکول های بخش عایق، که بین دو الکترود قرار گرفته اند، در اثر نیروی بسیار می ترین لحظهای هوا به پلاسما نمونه ای از آن دچار تغییر ماهیت شده و یونیزه می گردند و به اصطلاح، عایق می شکند. رعدوبرق یا صاعقه، آنچه به عنوان یک خط در حال گسترش نورانی می بینیم، مسیر گذر جریان الکتریکی است که با تبدیل هوا به پلاسما آن را نورانی می کند؛ اما در پدیدهٔ تولزنی کوانتومی، که به ایجاد جریان تونلی منجر می شود، مادهٔ عایق بین دو الکترود هیچ تغییری نمی کند و این الکترونهای موادند که از این سد می گذرند؛ بنابراین، جریان تونلی بدون هیچ تغییری در ماهیت مادهٔ عایق و ایجاد جرقه رخی می موادند که از این سد می گذرند؛ بنابراین، جریان تونلی

#### 🛧 تصویربرداری از سطح با استفاده از جریان تونلی

عملکرد میکروسکوپ تونلی روبشی مبتنی بر سنجش جریان تونلی برقرارشده میان نوک سوزن این دستگاه و سطح جسم در حال بررسی است. از آنجاکه امکان برقراری جریان تونلی فقط میان دو جسم رسانا امکان پذیر است، میکروسکوپ تونلی روبشی فقط می تواند از سطح مواد رسانا تصویربرداری کند. به همین دلیل در شرایطی که سطح نمونهٔ موردمطالعه در صورت اکسیدشدن رسانایی خود را از دست بدهد، تصویربرداری در خلاء یا اتمسفر خنثی صورت می گیرد.

نکتهٔ مهمی که در ایجاد جریان تونلی باید مدنظر قرار گیرد این است که چنین جریانی در صورتی شکل خواهد گرفت که نیروی محرکهای برای آن وجود داشته باشد؛ یعنی باید اختلاف پتانسیلی میان نوک سوزن میکروسکوپ تونلی روبشی و سطح نمونه وجود داشته باشد تا جریان تونلی برقرار گردد. معمولاً، برای ایجاد چنین نیروی محرکهای اختلاف پتانسیلی حدود چند ده میلیولت (mV) تا چند صد میلیولت بین سوزن میکروسکوپ تونلی روبشی و سطح نمونه اعمال می شود. جهت این میدان الکتریکی اعمال شده جهت جریان تونلی حاصل را مشخص میکند ولی اعمال چنین اختلاف پتانسیلی شرط کافی برای برقراری جریان تونلی نیست. همان طور که پیش تر بیان شد، شرط اصلی پدیدهٔ تونل زنی کوانتومی این است که ضخامت یا ارتفاع سد انرژی به حدکافی کم باشد؛ از این رو، برقراری جریان تونلی زمانی ممکن خواهد بود که فاصلهٔ میان سوزن و سطح نمونه به قدر کافی کم باشد. به طور معمول و با اعمال اختلاف پتانسیل ذکر شده، جریان تونلی زمانی برقرار می شود که فاصلهٔ میان نوک موز و سطح نمونای پرانی که تران از این رو با تران می اختلاف پتانسیل

شدت جریان تونلی وابستگی بسیار زیادی به فاصلهٔ میان نوک سوزن و سطح نمونه دارد و بهصورت نمایی با تغییر فاصلهٔ بین نوک سوزن میکروسکوپ و سطح نمونه تغییر میکند (شکل ۵۴). مقدار این جریان معمولاً عددی بین ۱۰ پیکوآمپر تا ۱۰ نانوآمپر است. با توجه به نمایی بودن این رابطه، با تغییر بسیار کمی در فاصلهٔ بین سوزن و سطح (در حد چند دهم نانومتر) جریان تونلی بسیار تغییر میکند؛ برای مثال، با کاهش فاصلهٔ میان نوک سوزن و سطح نمونه به کمتر از mm ۲ شدت جریان تونلی افزایش شدیدی پیدا میکند؛ به نحوی که با کاهش این فاصله از mm ۲ به m ۲ جریان تونلی

در حدود هفت برابر افزایش مییابد (ناحیهٔ خاکستری در منحنی شکل ۵۴). این موضوع باعث میشود قدرت تفکیک میکروسکوپ تونلی روبشی به کمتر از ۱m ۰/۱ برسد.



حساسیت بسیار بالای جریان تونلی نسبت به فاصله، به بهبود قدرت تفکیک میکروسکوپهای تونلی روبشی در حد اتمی منجر می شود. این امر میکروسکوپهای تونلی روبشی را به یکی از دقیق ترین ابزارهای مشاهده در دنیای نانو تبدیل کرده است. با این حال، مهم ترین عامل تعیین کننده در دستیابی به چنین قابلیت تصویربرداری و قدرت تفکیک بالایی داشتن سوزنی مناسب با نوک بسیار تیز است. معمولاً، جنس سوزنهای استفاده شده در میکروسکوپهای تونلی روبشی از تنگستن یا آلیاژ پلاتین- ایریدیم است. هنگام آماده سازی این سوزنها سعی می شود تا نوک آنها تیز ترین حالت ممکن را داشته باشد. ایده آل ترین سوزن برای یک میکروسکوپ تونلی روبشی سوزنی است که نوک آن از یک اتم تشکیل شده باشد. شکل ۵۵ تصویری از سوزنی بسیار نوک تیز از جنس پلاتین نشان می دهد. در برخی موارد، ممکن است نوک سوزن در اصل از دو سر تشکیل شده باشد. چنین سوزنهایی کارایی و کیفیت تصویر حاصل را بسیار کاهش می دهند.



شکل ۵۵: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از یک سوزن میکروسکوپ تونلی روبشی از جنس پلاتین [۶۶]

پس از نزدیک شدن و قرار گرفتن سوزن در فاصلهٔ مناسب از سطح نمونه و برقراری جریان تونلی، با پیمایش کلی سطح توسط سوزن فرایند تصویربرداری انجام می شود. حرکت دادن سوزن بر روی سطح نمونه و نیز، تنظیم فاصلهٔ نوک آن از سطح با فرمان های ارسالی از مدار بازخورد و توسط بازوهای پیزوالکتریک و بادقتی در حد آنگسترم انجام می شود؛ به این تر تیب که بخش الکترونیک دستگاه جریان تونلی را تقویت می کند و به عنوان ورودی به مدار بازخورد می فرستد. مدار بازخورد با توجه به مقدار جریان تونلی و تنظیمات فرایند تصویربرداری، فرمان های لازم برای تصویربرداری را صادر می کند. طرحی از این فرایند در شکل ۵۶ نشان داده شده است.

۱۳۸

مطالعه ريزساختار نانومواد

در حالت جریان ثابت، که رایچترین حالت عملیاتی مورداستفاده است، واحد بازخورد و کنترل فاصله به گونهای فاصلهٔ بین سوزن و سطح نمونه را تنظیم می کند که جریان تونلی ثابت بماند؛ برای مثال، اگر جریان تونلی در حال افزایش باشد، یعنی فاصلهٔ بین نوک سوزن و سطح نمونه کاهش یافته است. در این شرایط، واحد بازخورد به بازوی پیزوالکتریک دستور می دهد که فاصلهٔ بین سوزن و سطح نمونه را افزایش دهد؛ درنتیجه، جریان تونلی کاهش می یابد. این فرایند تا زمانی ادامه دارد که فاصلهٔ بین سوزن و سطح برابر فاصلهٔ اولیه شود و درنتیجه، جریان تونلی با جریان تونلی اولیه برابر گردد. در این حالت، سوزن میکروسکوپ به شکل پستی وبلندی های سطح نمونه بالا و پایین می رود (شکل ۵۷– آ). این حالت برای سطوحی که پستی وبلندی های زیادی دارند مناسب است، اما برای پیمایش سطح مشابه زمان بیشتری نسبت به حالت ارتفاع ثابت نیاز دارد.



میکروسکوپ تونلی روبشی دارای دو حالت تصویربرداری جریان ثابت و ارتفاع ثابت است. حالت ارتفاع ثابت، حالتی است که در آن ارتفاع سوزن در طول پیمایش سطح نمونه همیشه ثابت میماند و درنتیجه، جریان همواره در حال تغییر است. با اندازه گیری جریان تونلی در نقاط مختلف نمونه، تصویر پستیوبلندیهای سطح نمونه بهدست میآید (شکل ۵۲- ب). این حالت برای بررسی سطح نمونههای هموارتر مناسب است و سرعت تصویربرداری بالایی دارد.



شکل ۵۸ تصویری از سطح یک ویفر سیلیکون را که توسط میکروسکوپ تونلی روبشی تهیه شده است نشان میدهد. اتمهای سیلیکون در این تصویر بهخوبی قابلمشاهدهاند و این امر نشاندهندهٔ قدرت تفکیک بسیار بالا و توانایی این نوع میکروسکوپ در تهیهٔ تصاویر بسیار دقیق از سطح انواع مواد رساناست.

- 1- Constant current
- 2- Constant height

مطالعه ريزساختار نانومواد

فكله لابارو

مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيک



#### 🔸 سایر کاربردهای میکروسکوپهای تونلی روبشی

علاوه بر تصویربردای از سطح مواد رسانا، قابلیتهای میکروسکوپهای تونلی روبشی موجب شده است که از آنها برای طیفسنجی تونلی روبشی (STS)<sup>۱</sup> و دستکاری سطح<sup>۲</sup> استفاده شود. از طیفسنجی برای مطالعۀ برخی خواص الکترونیکی، مانند چگالی حالتهای الکترونها و اندازه گیری شکاف انرژی استفاده میشود. در این حالت، با تغییر فاصلۀ سوزن و سطح یا تغییر اختلاف پتانسیل اعمالی، جریان تونلی اندازه گیری میشود، سپس، با رسم نمودارها و بررسی تغییرات خصوصیات مختلف استخراج می گردند.

حالت دستکاری زمانی استفاده میشود که هدف جابهجایی، قراردادن اتم جدید یا کندن اتم روی سطح باشد. جالب است همان دستگاهی که برای دیدن اتمها استفاده میشود، میتواند آنها را حرکت هم بدهد. در این حالت، به جای اندازه گیری جریان، نوک سوزن در نزدیکی اتم قرار می گیرد و جریان تونلی بین آنها اعمال میشود. این جریان باعث ایجاد جاذبه بین اتم نوک سوزن و اتم روی سطح میشود و درنتیجه، نوک سوزن اتم روی سطح را از جایش درمی آورد و حرکت میدهد. نخستین کسی که متوجه این قابلیت میکروسکوپ تونلی روبشی شد، شخصی به نام دون ایگلر<sup>7</sup> بود که در سال ۱۹۹۰ میلادی، با قراردادن ۳۵ اتم زنون روی سطحی از نیکل نام شرکتی را که در آن کار می کرد در مقیاس نانو ثبت کرد (شکل ۵۹).



## 🖲 میکروسکوپ نیروی اتھے

پس از اختراع میکروسکوپ STM و نمایانشدن توانمندیهای برجستهٔ آن برای مشخصهیابی مواد، در سال ۱۹۸۶ میلادی گرد بینینگ، یکی از دو مخترع STM، به کمک دو همکار خود، کالوین کویت<sup>1</sup> و کریستف گربر<sup>۵</sup>، موفق شد دومین عضو از خانوادهٔ میکروسکوپهای روبش سطح را معرفی کند (شکل ۶۰). این میکروسکوپ برای مطالعهٔ سطح

- 3- Don Eigler
- 4- Calvin Quate
- 5- Christoph Gerber

مطالعه ريزساختار نانومواد

<sup>1-</sup> Scanning tunneling spectroscopy

<sup>2-</sup> Surface manipulation

مواد از برهم کنش کوتاهبرد میان اتمها یا مولکولها، که دراصطلاح نیروی اتمی ٰ نامیده می شود، استفاده می کند و امکانات گستردهای را برای بررسی ویژگیهای فیزیکی سطوح فراهم ساخته است. میکروسکوپ AFM اطلاعات سطح را با احساس كردن سطح از طريق يك پروب مكانيكي جمع آوري مي كند و هم اكنون، محبوب ترين ميكروسكوپ از مجموعة میکروسکوپهای پروبی روبشی است.



شکل ۶۰: اولین میکروسکوپ AFM نگهداری شده در موزهٔ علم در لندن

توانایی میکروسکوپ AFM برای تصویربرداری سهبعدی از انواع سطوح رسانا و نارسانا، نرم و سخت، و نیز بافتهای زنده بادقت بسيار بالا موجب محبوبيت بسيار زياد اين ميكروسكوپ شده است. ميكروسكوپهاي AFM درصورت داشتن تجهيزات لازم و فراهمشدن شرايط مناسب، مي توانند تصوير برداري با وضوح اتمي هم انجام دهند. اين نوع ميكروسكوب برای تصویر برداری نیازی به خلاء یا آمادهسازی نمونه ندارد و می تواند در شرایط محیطی مختلف استفاده شود؛ به همین دلیل برای مطالعهٔ مواد حساسی مثل مواد زیستی بسیار مناسب است.

#### 🔸 نیروی اتمی

همانند میکروسکوپهای STM، میکروسکوپهای AFM هم با تکیه بر برهمکنش میان پروب و سطح نمونه تصویری از سطح تهیه میکنند. برهمکنشی که این میکروسکوپها از آن برای مطالعهٔ سطح بهره میبرند، نیروهای کوتاهبرد میان اتمهای سطح مادهٔ موردمطالعه و اتمهای نوک پروب است که به آن نیروی بین اتمی یا بهاختصار، نیروی اتمی گفته می شود. این نیروها درواقع، همان نیروهای وان دروالس ٔ هستند که بین اتمها یا مولکول ها در فاصلهٔ نزدیک وجود دارند و به افتخار فیزیکدان هلندی، یوهانس دیدریک وان دروالس، نام گذاری شدهاند.

نيروهاي واندروالس منشأ الكترواستاتيكي دارند و از جاذبهٔ ميان الكترونها و هستهٔ دو اتم مجاور و دافعهٔ ابرهاي الكتروني آنها حاصل مىشوند. وابستگى نيروهاي جاذبه و دافعهٔ الكترواستاتيكي موجب مىشود كه نيروهاي واندروالس هم وابسته به فاصله باشند؛ يعنى با تغيير فاصلهٔ ميان دو ذره، مقدار و جهت نيروى وارده هم تغيير مىكند. اين نيروها کوتاهبردند و اگر فاصله میان دو ذره زیاد باشد، مقدار نیرو به صفر کاهش پیدا می کند. بین دو اتم یا مولکولی که در فاصلهٔ نزدیک به هم قرار دارند، چهار نوع نیرو وجود دارد:

- انیروهای دافعهٔ ناشی از همپوشانی ابرهای الکترونی 🛇
- نیروهای دافعه یا جاذبهٔ الکترواستاتیکی ناشی از بارهای الکتریکی  $\otimes$ 
  - ک نیروهای جاذبهٔ ناشی از چندقطبیهای یایدار
  - ایروهای جاذبهٔ ناشی از دوقطبیهای القایی موقت 🔇

1- Atomic force

- 2- Van der Waals forces
- 3- Johannes Diderik van der Waals

Ser aller

برآیند این نیروها، که در فاصلهٔ نزدیک اثر می کنند، نیروهای وان دروالس نامیده می شود. این بر آیند را می توان با استفاده از رابطهٔ میدان نیرویی، موسوم به پتانسیل لنارد- جونز <sup>۱</sup> توصیف کرد. پتانسیل لنارد-جونز یک مدل سادهٔ ریاضی است که برهم کنش میان یک جفت اتم یا مولکول خنثی را توصیف می کند:

$$V_{LJ} = \varepsilon \left[ \left( \frac{r_m}{r} \right)^{12} - 2 \left( \frac{r_m}{r} \right)^6 \right] \tag{1}$$

در رابطهٔ فوق r فاصلهٔ میان دو ذره و ع بیشینه نیروی جاذبهای است که میان دو ذره وجود دارد؛ از آنجاکه در پتانسیل لنارد- جونز نیروی جاذبهٔ میان دو ذره با علامت منفی و نیروی دافعه با علامت مثبت نشان داده می شود، ع دارای علامت منفی بوده و دراصطلاح، عمق چاه پتانسیل نامیده می شود. r<sub>n</sub> نیز فاصلهای است که تابع پتانسیل لنارد- جونز دارای کمینه است. درواقع، بیشترین مقدار نیروی جاذبه میان دو ذره در فاصلهٔ r<sub>n</sub> و برابر ع- است.

شکل ۶۱ نشاندهندهٔ منحنی نیروهای واندروالس است که با تابع پتانسیل لنارد-جونز توصیف میشود. در فاصلههای دور، هیچ برهمکنشی از نوع برهمکنشهای واندروالس میان دو ذره (منظور اتم یا مولکول) وجود ندارد؛ درنتیجه، هیچ نیرویی به آنها وارد نمیشود. با نزدیکشدن دو ذره بههم و واردشدن به محدودهٔ اثر برهمکنشهای کوتاهبرد، نیروهای جاذبه به بعدریج اثر میکنند و باعث نزدیکترشدن ذرات به هم میشوند. وقتی دو اتم از فاصلهٔ دور به هم می نیروهای جاذبه به بعدریج اثر میکنند و باعث نزدیکترشدن ذرات به هم می موند. وقتی دو اتم از فاصلهٔ دور به هم می نیروهای جاذبه به می نیروی به آنها وارد نمی شود. با نزدیکترشدن ذرات به هم می موند. وقتی دو اتم از فاصلهٔ دور به هم می نیروی نیروی می خود، این نیروی نزدیک می شوند، ابتدا جاذبهٔ میان هستهٔ اتمها و ابرهای الکترونی آنها دو اتم را به سمت هم جذب میکند. این نیروی جاذبه اتمها را به حدی به یک دیگر نزدیک میکند که موجب همپوشانی ابرهای الکترونی آنها می شود و نیروی دافعهای پدید می آورد که موجب دورشدن اتمها از یک دیگر می گرده؛ به این صورت که با گذر از فاصلهٔ ساله می شود و به می و باده به عربی به می مود و نیروی مای جاذبه این نیروهای جاذبه اتمها را به حدی به یک دیگر نزدیک می گرده؛ به این صورت که با گذر از فاصلهٔ ساله به در به این نیروهای پدید می آورد که موجب دور شدن اتمها از یک دیگر می گرده؛ به این صورت که با گذر از فاصلهٔ m



در برهمکنشهای واندروالس، نیروهای جاذبه در فاصلهٔ بلندتری توانایی اثرگذاری دارند؛ ازاینرو، موجب میشوند که ذرات دور از هم به یکدیگر نزدیک شوند؛ این در حالی است که نیروهای دافعه دامنهٔ اثر کوتاهتری دارند و در فاصلههای کمتر از r<sub>m</sub> نمایان میشوند. شاید برهمکنشهای واندروالس و نیروهای حاصل از آنها در ابعاد تودهای ناچیز به نظر بیایند ولی در ابعاد اتمی و مولکولی بسیار چشمگیر و اثرگذار هستند؛ بهنحوی که آثار ناشی از آنها در ابعاد تودهای ن نمایان میشود؛ برای مثال، قابلیت موجوداتی مانند مارمولک برای راهرفتن روی سطحهای بسیار صاف و صیقلی به مطالعه ريزساختار نانومواد

<sup>1-</sup> Lennard-Jones potential

سبب برهم کنش های واندروالس میان سطح و پرزهای نانویی روی پای آنهاست (شکل ۶۲). وجود تعداد بسیار زیاد این یرزها بر روی دست و یای مارمولک و ایجاد سطح تماس ناشی از ابعاد نانویی پرزها، موجب می شود که جاذبهٔ کوتاهبرد بین مولکولهای سطح و مولکولهای سازنده پرزها بهراحتی، وزن مارمولک را تحمل کند و این امکان را به او بدهد که بر روی هر سطحی، بدون آنکه نیروی جاذبه مشکلی برایش ایجاد کند، راه برود.



شکل ۶۲: تصویری معمولی و میکروسکوپی از پرزهای پای مارمولک

#### 🛧 تصویربرداری از سطح با استفاده از نیروی اتمی

بزرگی و علامت نیروهای واندروالس تابعی از فاصلهٔ میان ذرات است. اگر این فاصله را بهدقت کنترل کنیم، با توجه به بزرگی و جهت نیروها، میتوانیم اطلاعات بسیاری از سطح ماده بهدست آوریم. میکروسکوپهای نیروی اتمی با استفاده از چنین امکانی به مطالعه، تصویربرداری و دستکاری سطح مواد در مقیاس نانو و حتی ابعاد اتمی یا مولکولی مى پردازند.

میکروسکوپهای نیروی اتمی، همانند میکروسکوپهای تونلی روبشی، از ابزاری نوک تیز برای نزدیکشدن به سطح و برهم کنش با آن استفاده می کنند. سوزنهای میکروسکوپ نیروی اتمی روی یک دستهٔ نگهدارنده، که به کانتیلور معروف است، قرار دارند. به مجموعهٔ سوزن و دستهٔ نگهدارنده، پروب ٰ گفته می شود. نوک سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی را تا حدممکن تیز میسازند؛ ضخامت دستهٔ نگهدارندهٔ سوزن نیز بسیار نازک ساخته میشود تا بهراحتی، نوک سوزن و سطح نمونه در اثر برهمکنشهای واندروالس خم شود و امکان نزدیک یا دورشدن سوزن در اثر این نیروها از سطح را فراهم آورد. چنین ساختاری موجب میشود که هر تغییر شکل یا جایهجایی در پروب قابل آشکارسازی باشد. پروب میکروسکوپ نیروی اتمی با نزدیکشدن به سطح نمونه به ناحیهای وارد میشود که نیروهای واندروالس تأثيرگذارند و با سوزن برهمكنش مىكنند و در اثر آن حركت پروب تحتتأثير قرار مىگيرد. چنين برهمكنشى با استفاده از سازوکار خاصی در میکروسکوپهای نیروی اتمی آشکارسازی میشود و براساس دادههای بهدستآمده اطلاعات سطح جمع آوری می گردد. شکل ۶۳ تصویری از دو نوع پروب میکروسکوپ AFM را نشان می دهد.



شکل ۶۳: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از دو نوع پروب میکروسکوپ نیروی اتمی [۷۰]

- 1- Cantilever
- 2- Probe

مطالعه ريزساختار نانومواد فصال جهارم

مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك

با توجه به اینکه جابهجایی پروب تحتتأثیر برهم کنشهای اتمی در ابعاد بسیار کوچکی صورت می گیرد، بهترین راه اندازه گیری چنین جابهجاییهایی استفاده از پرتو لیزر است. برای این منظور، سطح پشت پروب را صیقلی و آینهوار می کنند (معمولاً پوشش طلا) تا پرتو لیزر تابانده شده به آن به صورت کامل بازتاب شود. چنین فرایندی دراصطلاح، انحراف پرتو<sup>۲</sup> نامیده می شود. یک حسگر نوری، پرتو لیزر بازتابی از پشت پروب را آشکار سازی می کند؛ سپس، مقدار و جهت انحراف پروب مشخص می شود.

با روبش نقطهبهنقطهٔ سطح و پردازش دادههای حاصل، نقشهای از پستیوبلندیهای سطح و تصویر آن ایجاد میشود. شکل ۶۴ طرحی ساده از حسگر نوری مورداستفاده در میکروسکوپهای نیروی اتمی و نحوهٔ آشکارسازی جابهجایی پروب میکروسکوپ نیروی اتمی با استفاده از فرایند انحراف پرتو را نشان میدهد. حسگر نوری مورد استفاده چهار بخش آشکارسازی دارد که براساس محل تابش پرتو بازتابی از سطح پشت پروب، نوع و مقدار جابهجایی پروب AFM در اثر برهمکنش با سطح نمونه مشخص می شود.



میکروسکوپ نیروی اتمی برای تشخیص جایهجاییهای بزرگ (در حد میکرومتر و بیشتر) پروب و نمونه نسبت به هم، از موتور الکتریکی بسیار دقیقی استفاده میکند؛ با اینحال، برای اندازه گیری جابهجاییهای بسیار دقیق و در ابعاد نانومتر از بلورهای پیزوالکتریک بهره میبرد. چنین ساختاری امکان جابهجایی کنترل شدهای با دقت آنگسترم را برای پروب AFM فراهم می آورد. برای تصویربرداری از یک نمونه باید پروب AFM و نمونه نسبت به هم در سه جهت طول، عرض و ارتفاع با دقت بسیار بالا جابهجا شوند. سه بازوی پیزوالکتریک این جابهجاییها را انجام میدهند. بسته به طراحی مورداستفاده برای میکروسکوپ نیروی اتمی، ممکن است پروب در مکانی ثابت باشد و نمونه با استفاده از بازوهای پیزوالکتریک نسبت به آن جابهجا شود یا بر عکس. در معمول ترین حالت طراحی، پروب با استفاده از یک بازوی مکانیکی- پیزوالکتریک در راستای عمود بر سطح نمونه جابهجا میشود و نمونه هم با استفاده از دو بازوی مکانیکی- پیزوالکتریک در راستای طولی و عرضی حرکت می کند. شکل ۶۵ طرحی کلی از اجزای یک میکروسکوپ نیروی اتمی نشان می دهد.

پس از نزدیک شدن سوزن به سطح نمونه و آغاز برهم کنش با سطح، داده ها توسط حسگر نوری جمع آوری و توسط رایانه پردازش می شوند و براساس نتایج به دست آمده، دستورهایی به کنترل گر الکترونیکی ارسال می گردد. در ادامه، کنترل گر دستورات را به روبشگر ارتفاع و نگهدارندهٔ نمونه ارسال می کند تا رایانه پروب و نمونه را در راستای موردنظر و به اندازهٔ تعیین شده جابه جا کند. این فرایند با پیمایش کامل سطحی از نمونه که در دست مطالعه است ادامه می یابد و درنهایت، تصویری کامل از آن ایجاد می گردد. مطالعه ريزساختار نانومواد

P S


#### 🛧 حالتهای تصویربرداری میکروسکوپ نیروی اتمی

براساس فاصلهٔ میان سوزن و سطح نمونه و نوع برهم کنشی بین سطح نمونه و سوزن، حالتهای مختلف تصویربرداری برای میکروسکوپهای نیروی اتمی تعریف شده است. میکروسکوپهایی نیروی اتمی سه حالت کاری مختلف دارند: حالت ایستا<sup>۱</sup> یا تماسی،<sup>۲</sup> پویا<sup>۳</sup> یا غیرتماسی،<sup>۲</sup> و ضربهای<sup>۵</sup> یا نیمه تماسی<sup>۲</sup> شکل ۶۶ فاصلهٔ تقریبی نوک سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی و سطح نمونه و نیز، نوع برهم کنش موجود میان سوزن و سطح نمونه در هر یک از این حالتها را نشان میدهد.



حالت تماسی: سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی در حالت ایستا، در فاصلهٔ بسیار نزدیک به سطح قرار می گیرد؛ بهنحوی که سوزن سطح نمونه را لمس می کند؛ به همین دلیل این حالت را تماسی نیز مینامند. در این حالت کاری، نیروی دافعهٔ قوی میان نوک سوزن و سطح نمونه ایجاد می شود و در اثر آن دستهٔ نگهدارنده خم می گردد. در فرایند

- 1- Static mode
- 2- Contact mode
- 3- Dynamic mode
- 4- Non-contact mode
- 5- Tapping mode
- 6- Semi-contact mode

تصویربرداری تماسی، معمولاً سامانهٔ کنترلی میکروسکوپ به نحوی عمل میکند که با تنظیم محل روبشگر ارتفاع، نیروی دافعهٔ بین سوزن و سطح نمونه مقدار ثابتی باشد. با آغاز روبش و حرکت سوزن بر روی سطح موردمطالعه، با عبور از پستیوبلندیهای سطح، نیروی دافعه کم یا زیاد میشود و درنتیجه، مقدار خم شدن دستهٔ نگهدارنده تغییر میکند. این فرایند با سازوکاری که در شکل ۶۴ نشان داده شده است، آشکارسازی و ثبت میشود. با پردازش اطلاعات حاصل، مقدار جابهجایی عمودی موردنیاز برای ثابت نگهداشتن نیروی دافعه محاسبه میشود و بازوی روبش گر ارتفاع سوزن به سمت بالا یا پایین حرکت میکند. در حالت تصویربرداری تماسی، میتوان بهطور مستقیم از تغییرات مقدار خمش دستهٔ نگهدارنده یا دستور کنترلی رایانه، که مرسومتر است، برای تغییر ارتفاع پروب برای ایجاد تصویر استفاده کرد. شکل ۶۷ دو تصویر از چشم پشه را نشان میدهد که با استفاده از پیغام کنترل ارتفاع و خمش پروب تهیه شده است.



برای تصویربرداری حالت تماسی نیاز است که پروب انعطافپذیری کافی را برای خمشدن در اثر نیروهای دافعه یا جاذبه داشته باشد؛ ازاینرو، نگهدارندهٔ سوزن را نازک میسازند تا انعطاف کافی را بهدست آورد. شکل ۶۸ تصویری از یک پروب مورداستفاده برای تصویربرداری حالت تماسی را نشان میدهد.



مطالعه ریزساختار نانومواد مطالعه ریزساختار نانومواد

149

حالت نیمه تماسی: در شرایط محیطی بر روی سطح بسیاری از نمونهها لایهای از رطوبت شکل می گیرد که کار در حالت تماسی را با مشکل روبهرو می سازد. در چنین شرایطی نگه داشتن سوزن در نزدیکی سطح، به نحوی که نیروهای کوتاه برد دافعه قابل آشکار سازی باشند، بسیار دشوار می شود. به منظور رفع این مشکلات، حالت تصویر برداری به ضربه ای توسعه داده شد؛ در این حالت سوزن در حوالی فاصله ای که نیروی جاذبهٔ میان سطح نمونه و نوک سوزن بیشترین مقدار را دارد (r<sub>m</sub>) نوسان می کند. امروزه، حالت ضربه ای از متداول ترین حالتهای تصویر برداری میکروسکو چهای الکترونی روبشی در شرایط محیطی یا درون آب به شمار می رود.

در حالت ضربه ای، پروب با بسامدی برابر با بسامد تشدید <sup>۱</sup> یا نزدیک به آن شروع به نوسان میکند. این نوسان معمولاً با استفاده از یک بلور پیزوالکتریک، که بر روی نگهدارندهٔ پروب قرار دارد، ایجاد میشود و دامنه ای از چند نانومتر تا می شوند؛ این امر موجب می گردد که دامنهٔ نوسان محرک پروب با استفاده از سامانهٔ کنترل گر ثابت نگهداشته می شوند؛ این امر موجب می گردد که دامنهٔ نوسان پروب مادامی که تحت تأثیر نیروی خارجی قرار نگرفته باشد، ثابت بماند. با نزدیک شدن نوک سوزن میکروسکوپ الکترونی روبشی به سطح نمونه، نیروهای کوتاه برد جاذبه بر آن اثر می کند و دامنهٔ نوسان پروب را تغییر می دهد (معمولاً کاهش دامنه). این کاهش دامنه آشکارسازی و به رایانه و کنترل گر دستگاه گزارش می شود. درنهایت، با هدف تنظیم دامنه نوسان پروب به مقدار اولیه، پروب از سطح نمونه دور می شود. از این طریق تغییرات ارتفاع سطح نمونه توسط دستگاه ثبت می شود و تصویری سه بعدی از آن به دست می آید. در حالت ضربه ای، سوزن میکروسکوپ الکترونی روبشی همواره تا فاصلهٔ نزدیک از سطح می ود و تماسی جزئی با آن برقرار می کند؛ از این روب این حالت تصویر برداری را حالت نیمه تماسی هم می نامند. دلیل دیگر نام گذاری این حالت تصویر برداری به نام ضربه ای این است که در هر دور کامل از یک نوسان، سوزن میکروسکوپ الکترونی روبشی با یک بار تصویر برداری به نام ضربه ای این است که در هر دور کامل از یک نوسان، سوزن میکروسکوپ الکترونی روبشی با یک بار تماس با سطح، یک ضربه ملایم به سطح نمونه وارد می کند.

تماس بسیار محدود سوزن و سطح نمونه در حالت نیمهتماسی موجب می گردد آسیب بسیار کمی به نمونه و سوزن وارد شود. این امر از برهم کنش بسیار ملایم سوزن و سطح نمونه ناشی می شود. چنین برهم کنش های ملایمی امکان تصویربرداری از انواع بافتهای زنده و مولکول های زیستی را، که روی سطح تثبیت شدهاند، با استفاده از حالت نیمه تماسی ممکن می سازد. ایجاد تصویر در حالت ضربهای با استفاده از تغییر ارتفاع پروب یا تغییر دامنه نوسان پروب صورت می گیرد؛ شکل ۶۹ تصویری از گلبول های قرمز خون را نشان می دهد که در حالت نیمه تماسی تهیه شدهاند.



سخل ۲۰ نصویر میخروسخوب بیروی آدمی نهیه سده از کلبول های قرمز خون در خان نیمه نماس و با استفاده از (آ) تغییرات دامنه نوسان پروب و (ب) تغییر ارتفاع پروب [۷۱]

پروب مورداستفاده برای حالت ضربهای پیوسته در حال نوسان است؛ بنابراین، باید از استحکام و سختی مناسبی برخوردار باشد تا در حین روبش سطح دچار تغییر شکل نشود. ازاینرو، دستهٔ نگهدارندهٔ سوزن را ضخیم میسازند تا در حین نوسان دچار تغییر شکل ناخواسته نگردد. شکل ۷۰ تصویری از پروب مورداستفاده برای تصویربرداری در حالتهایی را نشان میدهد که پروب به صورت پیوسته نوسان میکند.

۱- بسامد تشدید (resonance frequency) بسامدی است که یک نوسان گر با بیش ترین دامنه نوسان می کند.



شکل ۷۰: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پروب میکروسکوپ نیروی اتمی مورداستفاده برای حالتهای نیمه تماسی و غیر تماسی [۷۱]

حالت نیمه تماسی برای تصویربرداری از انواع نمونهها بسیار کارآمد است. مهم ترین مزیتهای این روش عبارتاند از:

- ۵ دستیابی به قدرت تفکیک ۱ mn برای بسیاری از نمونهها
- ک حذف برهم کنشهای عرضی سطح نمونه با سوزن و بهبود نتایج تصویربرداری
  - 🗞 به حداقل رسیدن آسیب ناشی از تماس سوزن و سطح نمونه

این حالت، در مقایسه با حالت تماسی، سرعت روبش پایین تری دارد و موجب افزایش زمان موردنیاز برای تصویربرداری میشود.

حالت غیر تماسی: در حالت غیرتماسی یا پویا، هیچ تماسی بین سوزن و سطح نمونه برقرار نمی شود. در این حالت، پروب در فاصلهای دور از سطح نمونه قرار می گیرد؛ به نحوی که فقط نیروهای جاذبه میان نوک سوزن و سطح نمونه شکل می گیرد. در این حالت، پروب با بسامد تشدید خود یا بسامدی بالاتر شروع به نوسان می کند. دامنهٔ نوسان در این حالت، برخلاف حالت تماسی، چندان وسیع نیست. در حالت غیرتماسی پروب با دامنه ای در محدودهٔ چندین آنگسترم تا چند نانومتر (کمتر از ۱۰ mm)، نوسان می کند.

نیروهای جاذبهٔ واندروالس در فاصلهای حدود nn ۱۰ – ۱ تأثیرگذارند. این نیروها بر روی پروب در حال نوسان تأثیر میگذارند و سبب کاهش دامنهٔ نوسان و یا بسامد نوسان میشوند. این تغییرات در بسامد یا دامنهٔ نوسان، همانند آنچه پیشتر دربارهٔ حالت نیمهتماسی بیان شد، توسط سامانه کنترل و از طریق تغییر فاصلهٔ پروب از سطح نمونه جبران میشود و درنهایت، با استفاده از این اطلاعات تصویری از سطح نمونه بهدست میآید.

در این حالت تصویربرداری، همانند حالت نیمه تماسی، جنس دستهٔ نگهدارندهٔ سوزن بسیار سخت و انعطاف ناپذیر است. چنین استحکام بالایی این امکان را فراهم می آورد که پروبی در فاصلهٔ نزدیک به سطح نمونه، بدون هیچ مشکلی، با بسامد بالا (۴۰۰ kHz - ۴۰۰) نوسان کند. در این حالت، حساسیت بسیار زیاد این نوسان به نیروی جاذبهٔ واردشده از طریق برهم کنشهای وان دروالس با سطح، موجب افزایش چشم گیر دقت تصویربرداری می شود. اولین تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی با قدرت تفکیک اتمی با استفاده از این حالت کاری تهیه شده است.

امروزه، میتوان با پیشرفتهای صورت گرفته در فناوری تصویربردای با استفاده از میکروسکوپهای نیروی اتمی با روش غیرتماسی، از اترها و مولکولهای در حین تغییر و واکنش شیمیایی تصویربرداری کرد. این امر موجب میشود که روش غیرتماسی میکروسکوپ نیروی اتمی بهعنوان یکی از دقیق ترین و کارآمدترین روشهای تصویربرداری در ابعاد اتمی و مولکولی شناخته شود؛ به نحوی که در بسیاری از موارد، کیفیت تصویر بهتری از میکروسکوپهای نیروی اتمی ارائه میکند. شکل ۷۱ نشان دهندهٔ یکی از اولین تصویرهایی است که با استفاده از حالت تصویربرداری غیر تماسی میکروسکوپ نیروی اتمی از تغییر ساختار یک مولکول آلی و پیوندهای کووالانسی آن تهیه شده است. بطالعه ريزساختار نانومواد



حساسیت حالت غیرتماسی به برهم کنشهای بین اتمی و مولکولی به قدری است که میتوان با استفاده از این روش از انواع برهم کنشهای بین مولکولی هم تصویربرداری کرد. شکل ۷۲ اولین تصویر تهیهشده از پیوندهای هیدروژنی بین مولکولهای آلی را نشان میدهد که با استفاده از حالت غیرتماسی میکروسکوپ نیروی اتمی تهیه شده است.



شکل ۷۲: (آ) تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی از پیوندهای هیدر وژنی بین مولکول های آلی و (ب) ساختار مولکولی متناظر با مولکول های مطالعه شده: پیوندهای هیدر وژنی با خط چین نشان داده شدهاند (۷۵]

نبود تماس مستقیم میان سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی و سطح نمونه موجب می شود که بسیاری از مشکلات موجود در حالت تماسی در حالت غیرتماسی وجود نداشته باشد. ازاینرو، از این حالت تصویربرداری برای نمونههایی که سطحی نرم و حساس دارند، استفاده می شود. تفاوت چندانی میان استفاده از حالت تماسی و غیرتماسی برای نمونههای سخت وجود ندارد ولی اگر لایهای از رطوبت یا سایر مایعات روی سطح نمونهٔ سخت وجود داشته باشد، تفاوت بارزی میان دو تصویر تهیه شده با روش تماسی و غیرتماسی وجود خواهد داشت. در چنین شرایطی، در صورت استفاده از حالت تماسی، سوزن از سطح مایع عبور می کند و تصویری از سطح نمونه ارائه می دهد؛ هر چند که نیروهای موئین و برهم کنش های عرضی کیفیت تصویر را کاهش خواهند داد. در حالت غیرتماسی، تصویر از برهم کنش لایهٔ مایع که سطح نمونه را پوشش داده است، ایجاد خواهد شد. مزایای این حالت تصویربرداری را می توان در موارد زیر خلاصه کرد:

دقت بالا در تصویربرداری و رسیدن به قدرت تفکیک اتمی
امکان تصویربرداری از اتمها، مولکولها، و انواع پیوندها
نبود تماس مستقیم میان سطح نمونه و سوزن و آسیب ندیدن آنها

مطالعه ريزساختار نانومواد مفاهيم اوليه فاورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك

محسال چهارم

# این حالت تصویربرداری مشکلاتی هم دارد: نسبت به نوسان محیط بسیار حساس است سرعت روبش بسیار پایینی دارد فقط در شرایط خلاء انجامپذیر است

### 🔸 تأثیر شکل سوزن بر کیفیت تصویر

یکی از بزرگترین مشکلات در حین تصویربرداری با استفاده از میکروسکوپهای نیروی اتمی، ایجاد تصویر غیرواقعی<sup>۱</sup> است که به دلیل کیفیت یا شکل نامناسب سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی پیش میآید. این مشکلات را میتوان به سوزن غیر نوکتیز، سوزن دوسر، سوزن آلوده و سوزن مستهلک نسبت داد. شکل ۳۳ نشاندهندهٔ نحوهٔ ایجاد تصویر غیرواقعی به دلیل غیر نوکتیز بودن سوزن است. معمولاً، برای رفع این مشکل سعی میکنند نوک سوزن را بسیار کشیده و نوک تیز بسازند تا بتواند بهخوبی، سطح نمونه را روبش کند.



شکل ۲۳: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از (آ) یک سوزن هرمی غیر نوک تیز و (ت) سوزن کشیدهٔ نوک تیز؛ طرحی از نحوهٔ روبش سطح نمونه توسط (ب) سوزن هرمی و (ث) سوزن نوک تیز؛ و تصویر ایجادشده از (پ) سوزن هرمی شکل و (ج) سوزن نوک تیز [۶۷]

کارآمدترین راهحلی که برای رفع مشکل تیز نبودن سوزنهای میکروسکوپ نیروی اتمی ارائه شده است، رشددادن نانولولهٔ کربنی در نوک سوزن میکرومتری اولیه است. چنین سوزنهایی دراصطلاح، نانوسوزن نامیده میشوند و امکان تصویربرداری با قدرت تفکیک بسیار بالا را فراهم میکنند. این سوزنها به دلیل استحکام بالای نانولولههای کربنی از طول عمر بالایی برخوردارند. شکل ۷۴ تصویری از دو نانوسوزن را نشان میدهد که از نانولولهٔ کربنی در ساخت آنها استفاده شده است.



سوزنهای میکروسکوپ نیروی اتمی با گذر زمان و استفادهٔ مکرر آسیب میبینند و مستهلک میشوند. سوزن چنین پروبهایی دیگر کارایی مناسب برای تصویربرداری را ندارند و معمولاً، به تشکیل تصویرهای غیرواقعی و با کیفیت نامناسب منجر میشوند. شکل ۲۵ تصویری از یک سوزن تازه و همان سوزن پس از مستهلکشدن را نشان میدهد. مشکل دیگری که ممکن است برای پروبهای میکروسکوپ نیروی اتمی پیش آید، آلودهشدن نوک سوزن توسط بخشهایی از نمونه (معمولاً، در صورت استفاده از حالت تماسی) یا گرد و غبار محیطی است. این ذرات آلودگی با سطح نمونه برهم کنش دارند و موجب تداخل میان نیروی بین سوزن و سطح نمونه میشوند؛ درنتیجه، عملکرد میکروسکوپ مختل میشود و تهیهٔ تصویر واقعی از سطح نمونه ناممکن می گردد. شکل ۲۶ تصویری از یک پروب آلوده و نحوهٔ تداخل در تهیهٔ تصویر را نشان میدهد. شکل ۲۷ سه تصویر تهیهشده از یک نمونه با استفاده از پروبهای جدید، استفادهشده (آلوده) و مستهلک را نشان میدهد.



شکل۷۵: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از (آ) یک سوزن جدید و (ب) همان سوزن پس از استفادهٔ مکرر [۷۸]



شکل۷۶: (آ و ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از یک پروب آلودهٔ میکروسکوپ نیروی اتمی [۷۹] ، طر حی از (پ) نحوهٔ تداخل آلودگیهای سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی در فرایند روبش، و (ت) تصویر غیرواقعی ایجادشده در اثر آلودگی پروب میکروسکوپ نیروی اتمی



شکل۷۷: تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی تهیهشده از یک نمونه با استفاده از (آ) پروب جدید، (ب) پروب استفاده شده، و (پ) پروب مستهلک [۸۰]

مشکل دیگری که تصویربرداری با استفاده از میکروسکوپهای نیروی اتمی ناشی از کیفیت نامناسب سوزن و ایجاد سایه در تصویر به دلیل وجود سوزن دو سر است. در چنین شرایطی، هر بخشی از سطح دو بار با پروب برهم کنش می کند و درنتیجه، میکروسکوپ دچار دوبینی میشود و تصویرهای سایهدار حاصل می کند. شکل ۷۸ تصویری از یک سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی دو سر و تصویر حاصل از چنین سوزنی را نشان میدهد.



نیروی اتمی تهیه شده با استفاده از یک سوزن دو سر [۴۲]

در بسیاری از موارد، استفاده از پروبهایی که سوزن بسیار نوکتیز و باریک دارند، مانند نانوسوزنهای دارای نانولولهٔ کربنی، موجب دستیابی به تصویرهای بسیار با کیفیت و با قدرت تفکیک بالا میشود. با اینحال، در برخی موارد که سطح دارای عوارض جانبی است، سوزنهای نوکتیز معمولی کارایی چندانی برای تصویربرداری ندارند. در چنین شرایطی از سوزنهای خاصی که نوکهای جانبی دارند استفاده میشود. از این طریق امکان روبش عوارض جانبی هم امکان پذیر می گردد. شکل ۲۹ طرحی از مشکل استفاده از سوزنهای معمولی برای تصویربرداری از سطحهایی با عوارض جانبی و نحوهٔ حل این مشکل را نشان میدهد. شکل ۸۰ تصویری از سوزنهای مورداستفاده برای چنین سطحهایی را نشان میدهد.





سوزن دارای نوکهای جانبی [۸۲]

مطالعه ريزساختار نانومواد

# 🗇 مطالعه ساختار بلوری مواد

علاوه بر مطالعهٔ شکل ظاهری، بررسی چیدمان اتمی و نظم ساختاری نانومواد نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. می توان با استفاده از برخی از میکروسکوپهای الکترونی تصویری از چیدمان اتمهای یک ماده تهیه کرد (مانند شکل ۴۱). با چنین فرایندهای تصویربرداری بسیار پرهزینه و زمانبر است به هیچوجه توجیه اقتصادی ندارد. همچنین، این تصویرها را فقط می توان از تعداد اندکی نانوذره تهیه کرد؛ ازاینرو نیاز است که از روش دیگری برای مطالعهٔ چیدمان اتمی و ساختار بلوری مواد یا همان بلورشناسی استفاده کنیم. متداول ترین فرایندی که امروزه برای مطالعهٔ ساختار بلوری مواد استفاده می شود، تابش پرتو ایکس به نمونه و آشکارسازی انعکاس این پرتو از مادهٔ بلورین است که دراصطلاح، پراش پرتوایکس (XRD)<sup>1</sup> نامیده می شود.

## 🖲 پرتو ایکس

پیش از این، در بخش برهم کنش پرتو الکترونی و ماده بهطور مختصر از پرتو ایکس صحبت شد. پرتو ایکس بخشی از طیف امواج الکترومغناطیسی با طول موجی در حدود nm ۱۰۰ – ۱۰/۰ است که بین محدودهٔ فرابنفش (UV)<sup>۲</sup> و گاما (γ)<sup>۳</sup> قرار دارد (شکل ۸۱ – آ). نخستین بار فیزیکدان آلمانی به نام ویلهلم رونتگن<sup>۲</sup> در سال ۱۸۹۵ میلادی این پرتو را کشف کرد (شکل ۸۲). وی بهطور اتفاقی متوجه شد که وقتی مواد فلوئورسنت در نزدیکی لولهٔ پرتو کاتدی<sup>6</sup> قرار می گیرند، پرتو ناشناخته و جدیدی از خود ساطع می کنند و چون این پرتو تا آن زمان ناشناخته بود، نام آن را پرتوایکس (ناشناخته) نهاد. پرتوایکس با عنوان پرتو رونتگن هم شناخته می شود. رونتگن بابت این کشف بزرگ جایزهٔ نوبل فیزیک را در سال ۱۹۰۱ میلادی دریافت کرد. بهدنبال این کشف بزرگ، بررسیهای فراوانی روی ماهیت پرتوایکس صورت گرفت تا درنهایت، فون لاوه<sup>3</sup>، فیزیکدان آلمانی، ماهیت الکترومغناطیسی این پرتو را به اثبات رساند.

از زمان کشف پرتوایکس تاکنون، بررسیهای فراوانی روی ویژگیها و کاربردهای این پرتو انجام شده است. پرتو ایکس به سبب داشتن انرژی بالا، میتواند از مواد جامد و سخت عبور کند و به همین دلیل کاربرد گستردهای در تصویربرداریهای تشخیصی پزشکی از ساختار داخلی بدن (شکل ۸۱- پ)، دستگاههای امنیتی فرودگاهها و مراکز عمومی (شکل ۸۱- ب)، تصویربرداریهای تحقیقاتی از بدن جانداران (شکل ۸۱- ت)، تصویربرداری در مصارف این است که مواد با جرم اتمی بالاتر پرتوایکس را بیشتر جذب میکنند. بر همین اساس، در تصاویر رادیوگرافی<sup>۷</sup> پزشکی، نواحی چگال تر بدن، ازجمله استخوان، جذب بیشتری دارند و در تصویر نهایی سفیدتر نشان داده میشوند؛ در مقابل بافتهای نرم بدن، ازجمله استخوان، جذب بیشتری دارند و در تصویر نهایی سفیدتر نشان داده میشوند؛ رونتگن اولین فردی بود که با استفاده از این ویژگی و با ثبت تصویر دست همسر خود، نخستین جرقهٔ پیشرفت چنین کاربردهایی را فراهم کرد (شکل ۸۲). از طرفی طول موج کوتاه تر پرتوایکس، در مقایسه با نور مرئی، امکان برهم کنشهای متفاوت این پرتو با مواد را ممکن کرده است و کاربردهای متنوعی برای مشخصهیابی مواد، ازجمله مطالعهٔ ساختار

- 2- Ultra violet
- 3- Gamma ray
- 4- Wilhelm Rontgen
- 5- Cathode ray tube (CRT)
- 6- Von Laue
- 7- Radiography

فحيدان جيهارو

<sup>1-</sup> X-ray diffraction (XRD)

بنابراین در تابشهای طولانی و شدید بر بافتهای زنده تأثیرات مخربی دارد. بیشتر اوقات منابع پرتوایکس در محفظههای سربی قرار داده میشوند که به دلیل جرم اتمی بالا توانایی جذب و محدودسازی انتشار پرتوایکس در محیط را دارند.



شکل ۸۱: محدودهٔ پر توایکس در طیف امواج الکترومغناطیسی و بر خی کاربردهای آن؛ (آ) طیف امواج الکترومغناطیسی و محدودهٔ طول موج و انرژی پر توایکس؛ کاربرد پر توایکس در (ب) دستگاه تصویربرداری امنیتی فرودگاه، (ب) تصویربرداری تشخیصی پزشکی از قفسهٔ سینهٔ انسان، (ت) تصویربرداری تحقیقاتی از نوعی ماهی و (ث) مطالعهٔ ساختار بلوری مواد



شکل ۸۲: (آ) ویلهلم رونتگن، کاشف پر توایکس و (ب) تصویر ثبتشده از دست همسر رونتگن با استفاده از پر توایکس

🖲 تولید پرتو ایکس برای کاربردهای مختلف

بهموازات گسترش کاربردهای پرتوایکس، روشها و ابزارهای مختلف تولید آن نیز توسعه یافت. مدتی پس از کشف پرتو رونتگن، اولین مولد پرتوایکس ساخته شد که به لولهٔ پرتوایکس <sup>۱</sup> معروف است. پرتوایکس در این مولدها با سازوکاری مشابه آنچه هنگام برخورد پرتو الکترونی به سطح ماده رخ میدهد، تولید میشود. این لوله به شکل حباب شیشهای بسته و شامل یک الکترود منفی (کاتد) و یک الکترود مثبت (آند یا آنتیکاتد) است. با برقراری اختلاف پتانسیل زیادی بین کاتد و آند، مولکولهای گاز موجود در لوله به یون تبدیل میشوند و با برخورد به سطح کاتد، موجب ساطعشدن پرتو کاتدی یا همان الکترونهای گسیلشده از کاتد میشوند. پرتو کاتدی به سمت آند شتاب میگیرد و با برخورد به آن موجب گسیل پرتو ایکس از آند میشود.

لولههای اولیهٔ مولد پرتوایکس، حاوی گاز بودند و موجب جذب بخشی از پرتوایکس تولیدشده و ناپایداری و ناهمگونی طیف انرژی پرتوایکس می شدند؛ بنابراین پیشنهاد شد که در تولید پرتوایکس به جای لولههای محتوی گاز از لولههای خلاء استفاده شود. نخستینبار کولیج در سال ۱۹۱۳ میلادی این لولهها را معرفی کرد که به نام لولهٔ کولیج<sup>۱</sup> معروف شد (شکل ۸۳). ساختار بخشی از لولهٔ کولیج، که وظیفهٔ تولید پرتو الکترونی را دارد، مشابه تفنگ الکترونی نشر حرارتی است؛ با این تفاوت که نیاز نیست مانند میکروسکوپهای الکترونی، پرتو الکترونی تولیدی در حد نانومتر متمرکز شود. فشار درون لولهٔ کولیج تا Torr<sup>5</sup> دا کاهش می یابد و کاتد تنگستنی با سازوکار مشابه تفنگهای الکترونی نشر حرارتی، توسط عبور جریان الکتریسیته داغ می شود و از خود الکترون ساطع می کند. کلاهک ونلت اطراف کاتد پرتو الکترون را تا حدی که قطر آن بزرگتر از سطح کاتد نباشد، متمرکز می کند. درنهایت، برخورد پرتو الکترونی به آند موجب گسیل پرتو ایکس از آند می شود (شکل ۸۴). همانند آنچه در بخش برهم کنش پرتو الکترونی و ماده بیان شد، برخورد



معفظه شیشهای خلاء محل قرار گیری آند جریان خنک گننده برتو ایکس پرتو ایکس پرتو ایکس (ایجاد اختلاف پتانسیل) شکل ۸۲: طرحی ساده از لولهٔ مولد پر تو ایکس

100

در فرایند پرتوتابی ترمزی، الکترونهای پرانرژی پرتو کاتدی با نزدیکشدن به میدانهای الکتریکی قوی حاصل از ابر الکترونی اتمهای آند (شکل ۸۵، مرحله ۱)، در زمانی بسیار کوتاه در اثر نیروی دافعهٔ ابر الکترونی انرژی جنبشی و سرعت خود را از دست میدهند و جهتشان تغییر میکند (شکل ۸۵، مرحلهٔ ۲). بخشی از انرژی جنبشی ازدسترفته میتواند در قالب فوتونهای پرتوایکس آزاد شود که به آن پرتوایکس ترمزی گفته میشود (شکل ۸۵، مرحله ۳). درحالیکه در فرایند پرتوتابی مشخصه، که پیش از این بهطور خلاصه توضیح داده شد، تابش الکترونهای پرانرژی پرتو الکترونی به نمونه (شکل ۸۶، مرحله ۱) با تحریک الکترونهای ترازهای انرژی پایین در اتمهای آند موجب برانگیختگی یکی از این الکترونهای اتم آند و ایجاد جایی خالی میشود (یونش درونی<sup>۱</sup>) (شکل ۸۶، مرحلهٔ ۲). در این حالت، یکی از الکترونهای ترازهای بالاتر با بازگشت به تراز پایینتر، جای خالی این الکترون ازدسترفته را پر میکند (شکل ۸۶، مرحلهٔ ۳) که اختلاف بین این دو تراز انرژی در قالب فوتون پرتو ایکس گسیل میشود. این پرتو، پرتوایکس





با توجه به تعداد گذارهای بینترازی که ممکن است در یک اتم رخ دهد، هر اتم میتواند تعداد پرتوهای مشخصهٔ متنوعی داشته باشد. این پرتوها براساس این گذارهای بینترازی نامگذاری میشوند. ترازهای الکترونی از داخلیترین تراز به بیرون با نامهای K، L، M و ... شناخته میشوند. در صورتی که در اثر برهمکنش پرتو الکترونی و اتم، الکترونی از تراز X خارج شود، در اثر جایگزینی این الکترون با الکترونی از تراز X خارج شود، در اثر جایگزینی این الکترون با الکترونی از تراز X خارج شود، در اثر برهمکنش پرتو الکترونی و اتم، الکترونی از تراز X خارج شود، در اثر جایگزینی این الکترون با الکترونی از تراز X خارج شود، در اثر جایگزینی این الکترون با الکترون از تراز بالاتر، پرتو ایکس گسیلمی شود که آن را با پرتو X مشخص میکنند. با این حال ممکن است که الکترون جایگزین از هر یک از ترازهای بالاتر به این تراز منتقل شود؛ از اینرو، در هر یک از این احتمالها پرتوایکسی با انرژی و طول موج متفاوت گسیل خواهد شد. در این شرایط، نوع گذار بینترازی رخ داده را با استفاده از زیروندهای ۵، ۹، ۲۰ و ... میشخص میکنند. اگر پرتوایکس حاصل انتقال نوع گذار بینترازی رخ داده را با استفاده از زیروندهای ۵، ۹، ۲۰ و ... مدخص میکنند. اگر پرتوایکس حاصل انتقال

الکترون از تراز L به تراز K باشد، آنرا K<sub>α</sub> و اگر حاصل گذار الکترونی از M به K باشد، آنرا K<sub>β</sub> مینامند. به همین ترتیب، گذار از تراز M به تراز L را L و گذار از تراز N به تراز L را L<sub>β</sub> مینامند. نکتهای که باید مدنظر قرار گیرد این است که همواره، احتمال تولید پرتوهای نوع α بیشتر از سایر پرتوهاست. از آنجاکه پرتوهای ایکس β و γ از جایگزینی الکترونهای پر انرژیتری حاصل میشوند، طول موج کوتاهتر و انرژی بیشتری نسبت به پرتوهای ایکس α دارند.

بهطورکلی، اگر نمودار شدت پرتوایکس نشرشده از لولهٔ پرتوایکس را به نسبت طولموج آن رسم کنیم، مطابق شکل ۸۷، نموداری پیوسته با تعدادی قله در طولموجهای مشخص به دست میآید. بخشهای پیوستهٔ نمودار نشاندهندهٔ پرتوایکس ترمزی است و میتوانند طیفی از انرژی را داشته باشند و قلههای نمودار نیز، مربوط به پرتوهای ایکس مشخصه است که بسته به جنس آند و انواع گذارهای الکترونی که بین تراز بالاتر و پایین تر انجام شده است، فقط در طولموجهای مشخصی ثبت میشود<sup>1</sup>. جنس آند استفاده شده در کاربردهای مختلف، متفاوت است؛ برای مثال در تصویربرداریهای پزشکی، اغلب از آند تنگستن (W) و گاهی از مولیبدن (MO) و در مشخصهیابی مواد بلورین، اغلب از آند مس (Cu) و یا کبالت (Co) استفاده میشود. در جدول ۳ برخی از فلزات مورداستفاده به عنوان آند لولهٔ پرتوایکس



شکل ۸۷: منحنی شدت پر توایکس خروجی از لولهٔ پر توایکس نسبت به طولموج پر تو. در اینجا از آند مولیبدن و اختلاف پتانسیل ۳۵ کیلوولت در لولهٔ پر توایکس استفاده شده است

جدول ۳: برخی از فلزات مورداستفاده بهعنوان آند لولهٔ پر تو ایکس و طول موج پر توهای ایکس مشخصهٔ حاصل از آنها					
K <sub>β</sub> (Å)	K <sub>α</sub> (Å)	عدد اتمی	جنس آند		
۱/۷۵۶	١/٩٣٨	75	آهن (Fe)		
۱/۵۰۰	١/۶۵٩	۲۸	نیکل (Ni)		
1/٣٩٢	1/241	٢٩	مس (Cu)		
• /877	• / Y \ \	47	موليبدن (Mo)		
۲/۰۸۴	۲/۲۹۰	٢۴	کروم (Cr)		
1/85.	١/٧٩٠	۲۷	کبالت (Co)		

۱- پرتوهایی که دارای یک طول موج یا انرژی فوتون مشخص هستند، تکفام نامیده میشوند.

محسال چهارم

🖲 برهم کنش پرتو ایکس با ذرات

بهطورکلی، پرتوهای الکترومغناطیسی در برخورد با ذرات، رفتارهای متفاوتی ازجمله جذب<sup>۱</sup>، عبور<sup>۲</sup>، بازتاب<sup>۳</sup> (انعکاس)، شکست<sup>†</sup> (انکسار)، پراکندگی و پراش<sup>۵</sup> نشان میدهند (شکل ۸۸). پرتوهای ایکس نیز بههمینشکل، هنگام برخورد با ذرات رفتارهای متفاوتی دارند. در اینجا تفاوت فرایند پراش و پراکندگی را توضیح میدهیم که به شناخت اصول پراش پرتوایکس کمک خواهد کرد.

پراش پدیدهای است که دربارهٔ یک موج هنگام عبور از یک شکاف یا حفره که اندازهٔ آن قابل مقایسه و هممرتبه با طول موج پرتو عبوری است؛ همچنین، ممکن است هنگام برخورد یک موج با یک مانع در محل لبهها رخ می دهد. این پدیده می تواند موجب انحراف امواج عبوری شود.

پراکندگی در اثر برخورد پرتو با ذرات ریزی که اندازهای در حد طولموج پرتو دارند، انجام میشود (شکل ۸۸). فرایند اساسی در روش پراش پرتوایکس، همان طور که از نام آن مشخص است، پراش پرتوهای ایکس در برخورد با نمونه است. در ادامه، به این مبحث خواهیم پرداخت.



🖲 پراش پرتو ایکس

در یک نگاه کلی، روش معمول مشخصهیابی پراش پرتوایکس برمبنای تابش پرتوایکس تولیدشده توسط لولهٔ پرتو ایکس به نمونه در زوایای مختلف و دریافت و تحلیل پرتوهای پراشیده از نمونه انجام میشود و هدف آن تعیین خصوصیات ساختار بلوری مواد است. اجزای دستگاه پراشنگار<sup><sup>3</sup></sup> اشعهٔ ایکس در کل شامل موارد زیر است (شکل ۸۹):

لولهٔ پر توایکس نصب شده بر روی بازوی متحرک: برای تولید پر توایکس فرودی بر نمونه
محل قرار گیری نمونه: اغلب نمونه به شکل پودر و گاهی لایهٔ نازک در محل مشخص قرار داده می شود؛

1- Absorption

- 2- Transmission
- 3- Reflection
- 4- Refraction
- 5- Diffraction
- 6- Diffractometer

بطالعه ريزساختار نانومواد

آشکارساز نصب شده بر روی بازوی متحرک: شدت پر توهایی که از سمت نمونه می آیند را دریافت و اندازه گیری می کند؛

اجزای نوری: اجزایی که برای کاهش پرتوهای ناخواسته بین منبع و نمونه یا بین نمونه و آشکارساز قرار می گیرند.



پراشنگار پرتوایکس با تاباندن پرتوایکس تکفام به نمونهٔ موردمطالعه، شدت پرتوایکس بازگشتی از نمونه را ثبت و بهصورت نمودار شدت پرتو ایکس بر حسب زاویه رسم میکند. با استفاده از این نمودار، اطلاعات ساختار بلوری نمونهٔ مورد مطالعه بهدست میآید.

طول موج پرتوایکس مورداستفاده در فرایند پراش اشعهٔ ایکس معمولاً، کمتر از ۲ ۸ است. این اندازه برابر فاصلهٔ میان اتمهای مواد جامد است. ازاینرو، فضای خالی میان اتمهای ماده برای پرتو ایکسی که به آن میتابد، مانند شکافی رفتار میکند که این پرتو باید از آن عبور کند. از آنجاکه بزرگی این شکاف (فاصلهٔ میان اتمها) و طول موج پرتو عبوری تقریباً هماندازه و قابلمقایسه است، پدیدهٔ پراش رخ میدهد.

فرض کنید مطابق شکل ۹۰، دو پرتوایکس موازی (پرتوهای فرودی ۱ و ۲) به سطح نمونهای که ساختار بلورین دارد، تابیده شود. به بیان ساده، پرتوایکس فرودی یا با برخورد به اتمهای نمونه برهم کنش میکند و منعکس میشود (پرتو فرودی ۱) یا از شکاف میان اتمهای سطح عبور میکند و توسط اتمهای زیرین بازتاب میشود (پرتو فرودی ۲). پرتوهای ایکس تابیده شده به سطح نمونه با عبور از فاصلهٔ میان اتمهای ماده پراشیده میشوند؛ ازاینرو، پرتوهای بازگشتی از نمونه پرتوهایی پراشیده هستند.

در اینجا باید توجه کرد که پرتوهای زیرین (پرتوهای ۲ و ۴) مسافت بیشتری نسبت به پرتوهای بالایی (پرتوهای ۱ و ۳) طی میکنند. اختلاف مسافت طیشده بین پرتوهای مختلف عبوری از فاصلهٔ بین اتمها سبب ایجاد اختلاف فاز میان این پرتوها میشود. این اختلاف فاز به زاویهٔ تابش پرتو به سطح نمونه وابسته است و میتواند موجب برهمنهی سازنده یا ویرانگر پرتوها با یکدیگر شود.

فحسال جهارم

109



تغییر زاویهٔ پرتوهای ایکس تابانده شده به سطح نمونه، موجب تغییر فاصلهٔ طی شدهٔ پرتوهای عبوری از فاصلهٔ میان اتم ها می شود و اختلاف فاز این پرتوها را تغییر می دهد. با تغییر زاویهٔ تابش پرتوایکس به نمونه و تغییر اختلاف فاز پرتوهای پراش شده این احتمال وجود دارد که در زاویهای خاص از تابش پرتو به نمونه، برهم نهی سازندهای میان پرتوهای بازتابی پراش شده رخ دهد. دو فیزیکدان بریتانیایی به نام های لورنس براگ (پسر) و هنری براگ (پدر) رابطهای برای بیان ارتباط میان برهم نهش سازندهٔ پرتوهای پراش شده از ساختار نمونهٔ مور دمطالعه ارائه کردند. این پدر و پسر دریافتند که اگر مجموع اختلاف مسافت طی شده توسط پرتوهای زیرین با مسافت طی شده توسط پرتوهای بالایی (BD+CB در شکل ۵۹ که برابر BD+CB است)، برابر مضرب صحیحی از طول موج پرتوهای تابشی (۸) باشد، برهم نهی پرتوهای شکل ۵۹ که برابر BD+CB است)، برابر مضرب صحیحی از طول موج پرتوهای تابشی (۸) باشد، برهم نهی پرتوهای پراشیده سازنده است و پرتوها یکدیگر را تقویت خواهند کرد؛ در غیر این صورت، برهم نهی ویرانگر است. رابطهٔ ارائه شده توسط براگ پسر و پدر (رابطهٔ ۲) که اساس تحلیل های کمی در MRD را تشکیل می دهد، به قانون براگ <sup>۱</sup> معروف است. (۲)

در رابطهٔ ۲ (رابطهٔ براگ)، n معادل عدد صحیحی است که معمولاً، برابر ۱ در نظر گرفته میشود، λ طول موج پرتو ایکس، b فاصلهٔ بین صفحات اتمی و θ زاویهٔ بین محور پرتو و راستای صفحهٔ بلوری (زاویهٔ تابش) است. طرحی ساده از نحوهٔ برهمنهی سازنده و ویرانگر پرتوهای ایکس با تغییر زوایهٔ تابش مطابق این رابطه در شکل ۹۱ نشان داده شده است.



گئےل چہارم مطالعہ ریزساختار نانومواد پدر و پسر براگ که رابطهٔ بین زاویهٔ پرتو برخوردی (θ) و فاصلهٔ بین صفحات بلوری (b) را در قالب فرمول معرفی کردند، بهطور مشترک در سال ۱۹۱۵ میلادی، جایزهٔ نوبل فیزیک را از آن خود کردند. با استفاده از این رابطه، اگر زاویهای که در آن برهمنهی سازندهٔ بین پرتوها اتفاق افتاده است مشخص باشد، میتوان بهراحتی فاصلهٔ بین صفحات بلوری را، که یکی از ویژگیهای مهم مواد بلورین است، محاسبه کرد.

در پراشنگارهای پرتوایکس مولد پرتو و آشکارساز آن بر روی دو بازی متحرک نصب شدهاند. این دو بازو حول یک دایره، که نمونهٔ مورد مطالعه در مرکز آن قرار دارد، به سمت هم حرکت میکنند (شکل ۹۲). در نتیجهٔ چنین چیدمانی، پرتوایکس در بازهای از زوایای مختلف به نمونه تابیده میشود و پس از پراش، توسط آشکارساز دریافت و شدت آن اندازه گیری می گردد. درنهایت، براساس دادههای بهدستآمده، منحنی مشابه شکل ۹۳ که محور افقی آن دو برابر زاویهٔ تابش پرتوایکس به سطح نمونه (۲) و محور عمودی شدت پرتوهای پراشیده است، رسم می شود. منحی شدت پرتوایکس بر حسب دو برابر زاویهٔ تابش اشعهٔ ایکس را دراصلاح، الگوی پراش پرتوایکس می نامند. در این منحنی، در زوایایی که پرتوها تداخل سازنده دارند و یکدیگر را تقویت می کنند، افزایش شدت



ف*ض*ال چہارم مطالعہ ریزساختار نانومواد

مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك

هریک از جهات مختلف صفحات بلوری نمونه، به دلیل فاصلهٔ متفاوتی که دارند (b)، در زاویهٔ مشخصی پیک ایجاد میکنند. بنابراین، در طیف پراش حاصل، اندیس میلر جهت صفحهای که پیک ایجاد کرده است در بالای پیک نوشته می شود. به صورت نظری، یک الگوی پراش کامل، باید پیکهای مربوط به همهٔ صفحههای بلوری نمونهٔ مور دمطالعه را داشته باشند. با این حال، ممکن است در شرایط واقعی تمام پیکها قابل آشکارسازی نباشند. معمولاً، برای مطالعهٔ یک ساختار باید ۵ پیک از پیکهای مشخصهٔ آن آشکارسازی شوند تا نتایج به دست آمده قابل اعتماد باشد.

## یادآوری برخے نکات از بحث های پیشین

حال که مفهوم پراش بیان شد، میتوان برخی مواردی را که پیش از این با سادهسازی بیان شده بود مجدداً و با تکیه بر مفهوم پراش امواج بیان کرد. اگر آنچه دربارهٔ سازوکار ایجاد رنگهای متنوع در بال پروانههای مورفو را به خاطر بیاورید، خواهید دید که درواقع، آنچه موجب ایجاد رنگهای متنوع میشود پراش پرتوهای نور مرئی از میان ساختارهای نانومقیاس موجود در پوستههای بال پروانه است که برهمنهی سازنده یا ویرانگر پرتوهای نوری را در پی دارد (شکل ۱۷). از آنجاکه پرتو نور مرئی یک پرتو ترکیبی از چندین طول موج است، پراش پرتو نور از ساختارهای نانومقیاس موجود در بال پروانه موجب میشود که این پرتوها در زاویههای خاصی برهمنهی سازنده داشته باشند و در باقی زاویهها دارای برهمنهی ویرانگر باشند. ازاینرو، در هر زاویهٔ دیدی، نور خاصی به چشم ناظر می دسد. فرایند پراش نور مرئی از ساختار نانوئی بال پروانهٔ مورفو نوعی تفکیک پرتو نور مرئی مرکب به پرتوهای تکرنگ سازندهٔ آن است.

حال آنچه دربارهٔ طیفسنج توزیع طولموج (WDS) مورداستفاده در میکروسکوپهای الکترونی مطرح شد را به یاد بیاورید. بیان شد که در این طیفسنج، پرتوایکس ساطعشده از نمونه به یک قطعهٔ بلورین تابیده میشود و پرتوها براساس طولموجی که دارند، در زاویههای خاصی منعکس میشوند و یک آشکارساز متحرک با حرکت در مسیری دایرهای شدت هر پرتو را میسنجد. آنچه در این فرایند رخ میدهد پراش پرتوایکس مرکب از چند طول موج مختلف از طریق بلور مورداستفاده در آشکارساز است. ازاینرو، پرتو مرکب در اثر پراش و برهم نهیهای سازنده و ویرانگر به پرتوهای تک طولموجی، که هر کدام در یک زاویهٔ خاص منعکس شدهاند، تفکیک میشود. درنهایت، میتوان بهراحتی و با جابهجاکردن آشکارساز در مسیر این پرتوها شدت آنها را تعیین و طیف توزیع انرژی (EDX) نمونه را رسم کرد و از عناصر تشکیلدهندهٔ آن آگاه شد.

💿 تحلیل کیفے دادہھای پراش پرتو ایکس

مواد مختلف چیدمان و نظم اتمی منحصربهفرد خود را دارند و درنتیجه، دارای الگوی پراش متفاوتی با یکدیگرند؛ برای مثال دو مادهٔ مختلف مانند سیلیکا (SiO<sub>2</sub>) و تیتانیا (TiO<sub>2</sub>) و یا هر ماده دیگری، الگوهای پراش متفاوتی دارند. همچنین، ممکن است یک ماده فازهای بلوری مختلفی هم داشته باشد که در اینجا هر فاز بلوری الگوی پراش منحصربهفردی خواهد داشت باشد که در اینجا هر فاز بلوری الگوی پراش منحصربهفردی خواهد داشت؛ برای مثال کوارتز<sup>1</sup> (ساختار سهوجهی<sup>۲</sup> یا شش وجهی<sup>۳</sup>)، کریستوبالیت<sup>1</sup> (ساختار چهاروجهی<sup>6</sup>) و شیشه خواهد داشت؛ برای مثال کوارتز<sup>1</sup> (ساختار سهوجهی<sup>۲</sup> یا شش وجهی<sup>۳</sup>)، کریستوبالیت<sup>1</sup> (ساختار چهاروجهی<sup>6</sup>) و شیشه (ساختار بی شکل)، هر سه ساختارهای متفاوتی دارند. در مواردی که نمونه مخلوطی از دو یا چند فاز ساختاری دلیل ساختار متفاوت بلوری، الگوهای پراش مشاوتی دارند. در مواردی که نمونه مخلوطی از دو یا چند فاز ساختاری دلیل مخلو

- 3- Hexagonal
- 4- Cristobalite
- 5- Tetragonal

مطالعه ريزساختار نانومواد

<sup>1-</sup> Quartz

<sup>2-</sup> Trigonal

مواردی، با توجه به اینکه پیکهای مربوط به هر فاز در زوایای مشخص تشکیل میشوند، میتوان با درنظرگرفتن شدت نسبی پیکهای فازهای مختلف، مقدار نسبی هر فاز را در نمونهٔ مخلوط بهدست آورد. ولی در بسیاری از موارد، ممکن است که یک یا چند پیک از پیکهای مشخصهٔ دو ترکیب متفاوت با هم هم پوشانی داشته باشند. این امر تحلیل دادهها را با دشواری بسیاری روبهرو میکند. با توجه به شکل ۹۴ مشاهده میکنید که ساختارهای بیشکل، مانند شیشه، طیف پراش پیوسته دارند و فاقد پیکهای مشخصیاند.



گاهی در یک نمونه بهدنبال وجود یا عدموجود یک مادهٔ خاص هستیم (تجزیه شیمیایی). کاربرد اصلی روش XRD، آنالیز ساختاری است اما تجزیهٔ شیمیایی هم تا حدودی با آن امکان پذیر است؛ به این صورت که ابتدا، پیکهای مشخصهٔ مادهٔ موردنظر خود را از پایگاههای اطلاعاتی موجود پیدا می کنیم (طیف الگو) و بر الگوی پراش حاصل از نمونه تطبیق می دهیم (شکل ۹۵). اگر پیکهای اصلی (پیکهای با شدت بیشتر) طیف الگو در الگوی حاصل از نمونه موجود باشد، می توان گفت که مادهٔ موردنظر در نمونه وجود دارد. البته گاهی تفاوتهای جزئی در زوایای پیکهای الگو با طیف حاصل از نمونه مشاهده می شود که معمولا، به دلیل وجود عیوب ساختاری در نمونه و وجود ناخالصی در ساختار بلوری نمونه ایجاد شده است و می توان از آن صرفنظر کرد.



ثصال چہلر*ج* مطالعہ ریزساختار نانومواد

مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك

🖲 تحلیل کمے دادوہای پراش پرتو ایکس

اولین دادهای که میتوان با استفاده از الگوی پراش پرتو ایکس دربارهٔ یک ساختار بلوری بهدست آورد، فاصلهٔ میان صفحات بلوری است که عامل پراش محسوب میشوند. هر پیک در الگوی پراش بهدستآمده، مربوط به یک راستای بلوری است. با قراردادن زاویهٔ پراش (θ) مربوط به هر صفحهٔ بلوری و قراردادن مقدار طول موج پرتوایکس مورداستفاده برای مطالعه در رابطهٔ براگ، فاصلهٔ بین صفحات بلوری (b) در هر راستا قابل محاسبه است.

بهمرورزمان، روشها و رابطههای محاسباتی و تحلیلی گسترده شدند و برای تحلیل کمّی دادههای XRD توسعه یافتند. در این بین، رابطهای موسوم به رابطهٔ شرر<sup>1</sup> (رابطهٔ ۳) به سبب سادگی در بهدست آوردن متغیرهای موردنیاز، به یکی از پرکاربردترین روابط برای تحلیل ساختار بلوری مواد با استفاده از الگوی پراش پرتوایکس تبدیل شده است. با استفاده از رابطهٔ شرر میتوان اندازهٔ بلورکها<sup>۲</sup> را بهطورتقریبی محاسبه کرد. منظور از بلورک، کوچکترین واحد بلوری در نمونهٔ موردمطالعه است که هیچ ایراد ساختاری ندارد. معمولاً، اندازهٔ بلورکها از اندازهٔ ذرات کوچکتر است، مگر در شرایطی که نمونهٔ موردمطالعه از ذرات تکبلور، که فاقد ایراد ساختاریاند، تشکیل شده باشد.

برای این منظور، ابتدا پیکی که بیشترین شدت را در الگوی پراش دارد درنظر می گیریم و پهنای پیک را در نصف شدت بیشینهٔ آن به دست می آوریم. این کمیت را به صورت اختصاری با <sup>۳</sup> FWHM ( ۵ در رابطهٔ شرر) نشان می دهند. روش محاسبه MHM به این صورت است که ابتدا بیشینهٔ شدت پیک را تعیین و در نصف این شدت، پهنای پیک را محاسبه می کنیم ( $\theta - \theta$  در شکل ۹۶) که معادل همان FWHM است. دقت داشته باشید که این مقدار بر حسب زاویه به درجه است و باید به رادیان تبدیل شود (هر ۳۶۰ درجه معادل ۲ رادیان است). اکنون با جایگذاری این مقادیر در رابطهٔ شرر می توان اندازهٔ بلورک (D) را محاسبه کرد (رابطهٔ ۳). باید این نکته را مدنظر قرار دهید که ممکن است نتایج حاصل از این رابطه خطای قابل توجهی داشته باشد.

$$D = \frac{0.9\,\lambda}{\beta.\cos\theta} \tag{(7)}$$

در این رابطه (رابطهٔ شرر) D اندازهٔ بلورک، λ طولموج پرتو ایکس، β پهنای پیک در نصف شدت بیشینه و θ زاویهٔ پراش (برحسب رادیان) است.



- 2- Crystallite
- 3- Full width at half maximum

مطالعه ريزساختار نانومواد

با توجه به رابطهٔ شرر، میتوان دریافت که هرچه پیک مشخصهٔ یک الگوی پراش پهنتر باشد و شدت کمتری داشته باشد، نمونهٔ موردمطالعه دارای بلورکهای کوچکتری است. بهطورمعمول، وجود بلورکهای کوچک دلیلی بر اندازهٔ کوچک ذرات نمونه است. ازاینرو، هنگامی که الگوی پراش یک نمونه پیکهای کوتاه و پهن دارد، این امر بیانگر وجود ذرات کوچک در آن نمونه است.

💿 مزایا و معایب روش پراش پرتو ایکس

روش پراش پرتوایکس روشی ارزان و دردسترس است که در زمان کوتاهی (حدود ۳۰ دقیقه برای یک نمونه معمولی) امکان مطالعهٔ ساختار بلوری یک نمونه را بدون آسیبزدن به ساختار آن میسر میکند. همچنین، در این مشخصهیایی، آمادهسازی خاصی برای نمونه وجود ندارد. روش پراش پرتوایکس طیف گستردهای از اطلاعات ساختاری مواد را فراهم میکند، ازجمله فاصلهٔ بین صفحات بلوری، ثابت شبکه، نوع شبکهٔ بلوری، جهت ترجیحی نظم اتمها، اندازهٔ بلورک، ترکیب فازی<sup>(</sup> نمونه، تغییرات ساختاری ناشی از اعمال فرایندی خاص روی نمونه و ترکیب شیمیایی نسبی.

یکی از بزرگترین معایب روش مذکور این است که به دلیل شدت کم پرتو ایکس پراشیده شده از نمونه، این روش قدرت تفکیک کمی دارد. این امر موجب می شود که در نمونه هایی که ذرات کوچکی دارند و غلظت ذرات در آنها کم است، نتوان پیکهای قابل تشخیصی از این ذرات به دست آورد. در صورتی با استفاده از روش پراش پرتوایکس متداول می توان پیکهای پراش نانوذرات بلورین را دید که این نانوذرات حداقل از پنج سلول واحد در هر سه راستای طول و عرض و ارتفاع تشکیل شده باشند. لازم به ذکر است که در چنین اندازه های کوچکی، به زمانی بسیار طولانی برای سنجش نمونه نیاز است. برای جبران نسبی این قدرت تفکیک پایین در پراش پرتوایکس، از نمونه های بزرگتر استفاده می شود. همچنین، هرچه نمونه بزرگتر باشد، ترکیب متنوع تری از انواع ساختارها خواهد بود.

درنتیجه، اطلاعات بهدست آمده در پراش پرتوایکس میانگینی از اطلاعات مربوط به هریک از اجزای نمونه است. مشکل دیگری که ممکن است به هنگام پراش پرتوایکس ایجاد شود در شرایطی است که در یک نمونه، اتمهای سنگین کنار اتمهای بسیار سبکتر قرار بگیرند. از آنجاکه شدت پرتو پراشیافته وابسته به عدد اتمی اتمهای نمونه است، در چنین شرایطی شدت پرتو پراشیده از اتمهای سبک در برابر شدت پرتوهای پراشیده از اتمهای سنگین ناچیز خواهد بود و همین امر موجب کاهش قدرت تفکیک میشود.

### 💿 مطالعه ساختار بلوری با استفاده از پراش پرتو الکترونے

پدیدهٔ پراش برای هر موجی که از یک شکاف کوچک عبور میکند رخ میدهد. پیش از این، دو مثال از پراش پرتوهای الکترومغناطیسی بیان شد: پراش پرتو نور مرئی از ساختار نانوئی بال پروانهٔ مورفو و پراش پرتوایکس از میان فواصل اتمی در بلورها. یکی از مهمترین کاربردهای این پدیده، مطالعهٔ ساختار بلوری مواد مختلف است. با این حال برای مطالعات بلورشناسی، الزامی به استفاده از پرتوهای ایکس وجود ندارد و میتوان از هر موجی که طول موج آن به حدکافی کوچک باشد و در اثر عبور از فواصل اتمی دچار پراش شود برای مطالعهٔ ساختار بلوری یک ماده استفاده کرد.

پرتو الکترونی مشخصات موردنیاز برای پراشیدهشدن از میان اتمهای یک بلور را دارد. ازاینرو، میتوان با استفاده از تاباندن پرتو الکترونی به یک بلور، الگوی پراش آن را بهدست آورد. به چنین الگویی دراصطلاح، الگوی پراش الکترونی<sup>۲</sup> میگویند. انجام چنین پراشی به پرتو الکترونی با طول موج (انرژی) مشخص، امکان هدایت

1- Phase composition

2- Electron diffraction pattern

گتــل چَهارم) مطالعه (يزساختار نانومواد پرتو به سمت نمونه و درنهایت، آشکارسازی نمونه نیاز دارد. چنین شرایطی در میکروسکوپهای الکترونی وجود دارد؛ ازاینرو، یکی از کاربردهای جانبی میکروسکوپهای الکترونی، مطالعهٔ ساختار بلوری مواد با استفاده از پراش پرتو الکترونی است.

الکترونهایی برای پراش پرتو الکترونی قابل استفادهاند که پس از برهم کنش با اتمهای نمونه، طولموجشان تغییر نکند؛ به این معنا که فقط الکترونهایی که دارای برهم کنش الاستیک با نمونه هستند برای پراش پرتو الکترونی کاربرد دارند. ازاینرو، فقط میتوان از الکترونهای برگشتی و عبوری از نمونه، که برهم کنش الاستیک دارند، برای این هدف استفاده کرد. استفاده از الکترونهای برگشتی برای پراش الکترونی و مطالعۀ ساختار بلوری ماده امکانپذیر است ولی چندان رایج نیست؛ بنابراین از بحث در مورد آن صرفنظر میشود. در ادامه، فرایند پراش الکترون با استفاده از الکترونهای عبوری به طورخلاصه معرفی میشود.

بهطورمعمول، مطالعهٔ ساختار بلوری مواد با استفاده از پرتو الکترونی با استفاده از میکروسکوپهای الکترونی عبوری صورت میگیرد. با توجه به اینکه پرتو الکترونی یک پرتو متمرکز و اندازهٔ نمونه بسیار بزرگتر از قطر این پرتو است، امکان پراشنگاری از کل نمونه وجود ندارد و الگوی پراش فقط از ناحیهای انتخابی تعیین میشود. پراش حاصل از پرتو الکترونی در میکروسکوپهای الکترونی عبوری را پراش الکترون از ناحیهٔ انتخابی (SAED)<sup>۱</sup> مینامند.

برای این امر، ابتدا ناحیهای از نمونه که الگوی پراش الکترونی باید از آن تهیه شود انتخاب می گردد. سپس، عدسیهای مغناطیسی به گونهای تنظیم می شوند که الکترونهای موجود در پر تو الکترونی به صورت موازی به نمونه بر خورد کند. در ادامه، با استفاده از روزنهٔ ناحیهٔ انتخابی (شکل ۱۹)، از میان الکترونهای عبوری، آنهایی که برهم کنش الاستیک دارند انتخاب می شوند و به آشکار ساز CCD یا فیلم عکاسی می رسند. در نهایت، تصویر الگوی پراش الکترونی از ناحیهٔ انتخاب شده به دست می آید. الگوی پراش به دست آمده از یک میکروسکوپ الکترونی، برخلاف الگوی حاصل از پراش نگار پر توایکس که یک نمودار است، یک تصویر است.

اگر نمونهای که پرتو الکترونی به آن میتابد تکبلور باشد، الگوی حاصل دارای یک نقطهٔ نورانی در مرکز و تعدادی نقطهٔ روشن در اطراف آن خواهد بود. نحوهٔ آرایش این نقاط در اطراف نقطهٔ مرکزی نشان دهندهٔ نظم بلوری موجود در ناحیهٔ انتخابی است و هر دسته از این نقاط نمایندهٔ یکی از صفحات بلوریاند (شکل ۹۷– آ). اگر ناحیهٔ انتخابی چندبلوری باشد یا چند ذرهٔ تک بلور در آن ناحیه وجود داشته باشد؛ الگوی حاصل دارای یک نقطهٔ پرنور در مرکز و حلقههای نورانی در اطراف آن خواهد بود (شکل ۹۷– ب).

درواقع، این حلقهها از چرخش نقاط مشاهده شده در الگوی حاصل از ساختار تکبلور در اطراف نقطهٔ مرکزی ایجاد شدهاند؛ هر یک از این حلقهها ناشی از یک صفحهٔ بلوری در شبکه بلوری مادهٔ مورد مطالعه هستند. درنهایت، اگر ناحیهٔ موردبررسی فاقد نظم بلوری باشد، هیچ الگویی ایجاد نمی شود و فقط یک نقطهٔ پرنور در مرکز تصویر مشاهده خواهد شد (شکل ۹۷- پ).



شکل ۹۷: تصویر میکروسکوپ الکتروی عبوری و الگوی پراش پر تو الکتروی از ناحیههای انتخابی (آ) تکبلور [۸۴]، (ب) چندبلوری [۸۵] و (ب) بیشکل [۹۴]

یکی از مهم ترین مزیتهای استفاده از پراش پرتو الکترونی برای مطالعهٔ ساختار بلوری ماده این است که می توان بهراحتی، نانوذرات کوچکی را که مطالعهٔ ساختار آنها با روش پراش پرتو ایکس امکان پذیر نیست بررسی کرد. شدت پرتو الکترونی پراشیده شده حدود <sup>۸</sup> ۱۰ برابر شدت پرتوایکس پراشیافته است. این امر موجب می شود که اطلاعات حاصل از پراش پرتو الکترونی دقیق تر از پراش پرتوایکس باشد.

فصل پنجم:



و شبیهسازی پدیدهها

در ابعاد نانو

نویسندگان همکار در این فصل: فائزه ابراهیمیان غازانی محمدامین کاتب صابر

# ا مقدمه:

مدلسازی<sup>۱۰</sup>\* و شبیهسازی<sup>۲</sup> انواع پدیدهها یکی از کارآمدترین ابزارهایی است که در اختیار دانشمندان و پژوهشگران قرار دارد و آنها را برای مطالعه و پیشبینی پدیدههای مختلف توانمند میسازد. استفاده از این روشها برای مطالعهٔ انواع پدیدهها در ابعاد نانو از اهمیت بسیاری برخوردار است و روزبهروز گسترش مییابد. استفاده از این روشها امکان مطالعهٔ پدیدههایی را میسر کرده است که پیش از این، به دلایل مختلف امکانپذیر نبود یا هزینهٔ بسیار زیادی در پی داشت.

# 🗞 مدلسازی

شکل ۱ تصویری از یک مدل قلب را نشان می دهد که برای مشاهدهٔ ساختار آن در کلاسهای آموزشی استفاده می شود. این پرسش وجود دارد که چرا باید چنین وسیلهای به عنوان مدل یکی از اعضای داخلی انسان وجود داشته باشد؟ جواب این سوال واضح است، برای نشان دادن شکل قلب نمی توان از یک قلب واقعی استفاده کرد اما دانش آموزان و دانشجویان نیاز دارند که شکل قلب را ببینند و با بخشهای داخلی آن آشنا شوند؛ در نتیجه، به وجود چنین وسیلهای نیاز است. مدل ها برای شرایط و نیازهای مختلف به وجود آمده اند؛ برای مثال، نمی توان تصویری از یک موجود خیالی را به دیگران نشان داد، مگر اینکه مدلی از آن ساخته شود. بسیاری از مسائل پیچیدهٔ اطراف ما قابل فهم نیستند مگر زمانی



شکل ۱: تصویری از مدل سهبعدی قلب انسان

که مدلی ساده از آنها داشته باشیم. مدلها مهمترین ابزار برای فهم درست اتفاقات اطراف و تصمیمگیری مناسب هستند.

# 💿 مدل علمے چیست؟

مدل علمی<sup><sup>7</sup> نمایشی ساده و قابلفهم از یک ایده، شئ، سامانه یا فرایند است که برای توصیف و توضیح پدیدههایی که نمیتوانند بهطورمستقیم تجربه شوند یا تجربهشان بسیار هزینهبر است، به کار میرود. مدلها یک روش دیداری و ذهنی از ارتباط بین آزمایش و نظریهاند و تحقیقات علمی را به سمت نمایشی ساده از واقعیتی که تجربهٔ آن با مشکلاتی همراه است راهنمایی میکنند.</sup>

در مدلسازی می توان یک پدیده را به دفعات مطالعه کرد و حالتهای مختلف آن را بارها آزمود، بدون اینکه با مشکلات، مخاطرات و هزینههای چنین فعالیتهایی در دنیای واقعی روبهرو شد. برایناساس، مدلها تصویری از پدیده یا فرایند موردنظر ارائه می کنند که با استفاده از آن و بدون نیاز به آزمایشها و اندازه گیریهای واقعی و تجربی، می توان رفتار و تغییرات یک پدیده را مطالعه کرد.

به بیان ساده، اگر دانشمندان نتوانند پدیدهای را بهطورمستقیم مشاهده کنند یا آزمایش کردن آن برای انسان با خطرات بسیاری همراه باشد یا تعداد به آزمایشاتی که هزینهٔ مطالعهٔ تجربی را بسیار بالا میبرد نیاز باشد، از مدلسازی استفاده میکنند. از مدلسازی برای بررسی پدیدههای به نسبت سادهٔ فیزیکی هم استفاده میشوند و الزامی وجود ندارد که حتماً از یک مدل برای توصیف پدیدههای پیچیده استفاده کرد.

<sup>1-</sup> Modeling

<sup>2-</sup> Simulation

<sup>3-</sup> Scientific model

🖲 چرا مدل سازی مےکنیم؟

مدلسازی از یک پدیده دید روشن و شفافی از موضوع موردمطالعه ایجاد میکند و پیچیدگیها و زوایای تاریک مسأله را تا حد زیادی از بین میبرد. همچنین، داشتن یک مدل ساده، کارآمد، و قابل فهم موجب راحتی و سرعت انتقال اطلاعات به دیگران میشود. مدلها کاربردهای مختلفی دارند؛ بعضی از مدلها راهی برای توصیف دادههای پیچیده پیدا میکنند و بعضی از آنها فرضیهای ارائه میدهند. مدلهای اولیهای که معماران از طرحهای خود برای ارائه به دیگران میسازند، مثالی از کاربردهای چنین مدلهایی است.

استفاده از انواع مدلها برای توصیف پدیدههای طبیعی، که بهطور مستقیم قابل لمس و تجربه نسیتند، یکی از کارآمدترین ابزارهای دانشمندان است. کمهزینهبودن چنین امکانی موجب میشود که دانشمندان در بسیاری از پرسشهای بزرگ علمی برای توضیحدادن یا پیشبینی یک موضوع مشخص، بیشتر از یک مدل پیشنهاد کنند. در چنین مواردی، مدلهای پیشنهادی مورد بحث و داوری دیگران قرار میگیرند و در این روند، ممکن است مدل آنها تکامل یابد و یا رد شود. بنابراین، مدلهای علمی به پیشرفت علم و جابهجایی مرزهای دانش کمک شایانی میکند. فرایند کشف ساختار اتم یکی از مثالهای علمی به پیشرفت علم و جابهجایی مرزهای دانش کمک شایانی میکنند. امکان تجربهٔ مستقیم آن وجود ندارد. بعد از اینکه تامسون مدل اتمی خود را ارائه کرد، سایر دانشمندان برای پیشبینی نتایچ آزمایشهای خود روی اتمهای مختلف از مدل اتمی تامسون استفاده میکردند. رادرفورد نیز طبق مدل اتمی تامسون، انتظار داشت که با تاباندن پرتو آلفا به ورقهٔ طلا تمام ذرات آلفا به حرکت مستقیم خود ادامه دهند یا انحراف بسیار کمی داشته باشند اما این گونه نشد. پس مشخص شد که مدل اتمی تامسون تمام ویژگیهای اتم را به درستی پیشبینی نمی کند. بنابراین، رادرفورد با تکیه بر مشاهدات خود مدل اتمی جدیدی پیشنهاد کرد. مدل اتمی او بعدها



در بسیاری از موارد، مدلها برای امتحان و پیشبینی کردن اتفاقات توسعه یافتهاند. بهترین مثال تغییر شرایط آبوهوایی است که در سالهای اخیر همواره بخش بزرگی از اخبار را به خود اختصاص داده است. شاید این سوال مطرح شود که مبنای برخی از ادعاها دربارهٔ تغییرات اقلیمی چیست؟ پاسخ این سوال استفاده از مدلهای آبوهوایی بلند مدتی است که دانشمندان آن را توسعه دادهاند. ما اطلاعات فراوانی دربارهٔ چرخهٔ کربن، چرخهٔ آب و موارد مشابه دیگر داریم. دانشمندان آن را توسعه دادهاند. ما اطلاعات فراوانی دربارهٔ چرخهٔ کربن، چرخهٔ آب و موارد هر یک از این متغیرها چه تأثیری بر روند حاکم بر طبیعت دارد و با تغییر در هر یک از آنها چه اتفاقاتی ممکن است در آینده رخ دهد. نتیجهٔ این تلاشها دستیابی به الگویی است که میتواند روند کلی تغییرات اقلیمی را توصیف کند؛ برای مثال، با استفاده از چنین مدلی میتوان از دادههای موجود استفاده کرد و پیشبینی کرد که اگر در ۲۰ سال آینده تولید و انتشار کربن دیاکسید را با همین نرخ ادامه دهیم، چه میشود؟ اگر با نرخ بیشتری تولید کنیم چه؟ اگر با نرخ کمتری تولید کنیم چه خواهد شد؟ نتایج این پیشبینیها، در صورتی اثبات صحت و درستیشان،

مقدمهای بر مدلسازی و شبیهسازز پدیدههای نانومقیاس

مفاهيم اوليه فناوري نانو و كاربردهاي آن در فيزيك

میتواند برای برنامهریزی کلی و سیاستگذاری برای توسعه فناوریها در آیندهٔ بلندمدت کارآمد باشد. چنین الگوهایی سیاستگذاران کشورها را از اتفاقاتی که ممکن است در آینده رخ دهد و آیندهٔ زمین را تهدید کند، آگاه میسازد و به آنها در تصمیم گیری صحیح کمک میکند. شکل ۳ نمونهای از نتایج استفاده از مدلی که روند تغییرات دمایی سطح زمین را پیش بینی میکند نشان میدهد. انطباق نتایج حاصل از این مدل با دادههای ثبت شده از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۰ میلادی نشان دهندهٔ صحت و دقت این مدل در بلندمدت است و آن را به الگویی قابل اعتماد برای سال های آینده تبدیل میکند.



## انواع مدل ها

بديدههاي د

بقدمهای بر مدل

با توجه به آنچه بیان شد، چند گروه مدل وجود دارد: گروه اول مدلهاییاند که ماهیت فیزیکی دارند و قابل لمس کردن، دیدن و تجربهٔ فیزیکیاند، مانند مدل اعضای بدن انسان. گروه دیگر مدلها ماهیت نظری دارند و قابلیت لمس فیزیکی و مشاهدهٔ عینی را ندارد بلکه بهصورت روابط ریاضی یا گذارههای منطقی مطرح می شوند. از نتایج حاصل از این مدلها برای توصیف پدیدهها یا پیش بینی آنها استفاده می کنیم، مانند مدل بیش بینی تغییرات اقلیمی.

### 🔸 مدلهای فیزیکی

مدلهای فیزیکی قابل لمس،مشاهده و تجربهٔ مستقیماند. این مدلها غالباً با اهداف آموزشی مورداستفاده قرار میگیرند؛ هر چند در موارد بسیاری، مدلهای فیزیکی از اجسام بزرگ در ابعاد کوچک ساخته میشود تا برخی آزمایشها بر روی آنها امکانپذیر باشد.

مدل دو بعدی: مدل دوبعدی مایشی از یک سامانه یا فرایند روی کاغذ است. استفاده از این نوع مدلها برای کاربردهای آموزشی بسیار رایج است؛ یک نمودار، تصویر یا نقاشی مدلهای دوبعدی هستند. برای مثال در کتابهای زیستشناسی تصویرهای متنوعی از ساختار انواع سلولهای زنده وجود دارد. این تصاویر با اعضای رنگشده این امکان را برای مخاطب فراهم میکند که بهراحتی تفاوت بین انواع سلولها را دریابد. اما هیچ سلول به این بزرگی نیست و هیچ یک از اعضای سلولها هم چنین رنگی ندارند. مقایسهٔ تصویر میکروسکوپی سلولها نشان میدهد

<sup>1-</sup> Two-dimensional Model

مفاهيم اوليه فناوري نانو و كاربردهاي آن در فيزيك

مقدمهای بر مدلس

که اجزای درون سلولها مانند تصاویر ارائهشده در کتابهای زیستشناسی نیستند. با اینوجود، این تصاویر مدلی آموزشی از موارد موردمطالعه را ارائه میدهند و هدفشان بهبود فرایند یادگیری است.

مدل سه بعدی: در بسیاری از موارد، یک نمودار یا تصویر برای فهم سیستم یا فرایند کافی نیست. گاهی نیاز است که آزمایشهای مختلفی برای افزایش دانش و آگاهی از یک پدیده صورت بگیرد. با اینحال مطالعهٔ نمونهٔ واقعی بسیار زمانبر و پرهزینه است. در این حالت، برای کاهش هزینهها و افزایش سرعت مطالعه، آزمایشهای موردنظر بر روی یک مدل با ابعاد کوچکتر صورت می گیرد. مدل های سهبعدی ، مدلی که طول عرض و ارتفاع دارد، کاملاً شبیه به سامانه اصلی ساخته می شوند و موردمطالعه قرار می گیرند. به طور کلی، دو نوع مدل سه بعدی وجود دارد: مدل ساختاری یا مدل ار گانیسم ً

مدلهای ساختاری نسخهای کوچک از یک ساختار بزرگترند. یک مدل از یک هواپیما، پل، خودرو یا یک طراحی برای ساختمان جدید، همه مدل ساختاری هستند. مهندسان همواره می کوشند که مدلهای بینقصی از طراحیهای خود بسازند تا از آنها در آزمایشها و مطالعات اولیه بهره بگیرند و ایرادهای طراحی اولیه را در پی ساخت نمونهٔ واقعی رفع کنند. چنین مدل هایی به دانشمندان کمک می کنند که بفهمند یک پل تا کجا در برابر زلزله مقاوم است، یک ساختمان تا چه حد میتواند در برابر طوفان ایستادگی کند، یک خودرو چه میزان فشار را میتواند تحمل کند یا بدنهٔ یک هواییمای تازه طراحی شده در سرعتهای بالا چه رفتاری از خود نشان میدهد. 🕺 شکل۴: تصویری از مدل یک هواپیمای در دست طراحی (۸۷] شکل ۴ تصویری از مدل یک هواپیمای در دست طراحی را نشان میدهد.

مدلهای ارگانیسمی (شکل ۵) به موجودات زندهای اشاره دارند که به دلیل برخی تشابههای ژنتیکی، در برابر عوامل بیماریزا و داروها رفتار مشابهی بدن انسان از خود نشان میدهند. فهم ما از بدن انسان هر روزه در حال کاملتر شدن است. دانشمندان علت بسیاری از بیماریها را کشف کردهاند و برای بسیاری از آنها هم به دنبال راه درمان اند. در این میان، یکی از مهمترین ابزارها استفاده از اورگانیسم مدلها یا حیوانات آزمایشگاهی است. تشابههای موجود میان عملکرد بدن انسان و این مدلها موجب میشود که بتوان در بسیاری از موارد، مطالعات اولیه را بر روی آنها انجام داد. به این دلیل است که همواره در اخبار مربوط به پیشرفتهای پزشکی خبرهایی از مطالعه بر روی موشهای آزمایشگاهی

نکتهٔ مهم دربارهٔ مدلهای ارگانیسمی این است که آنها بهترین انتخاب برای مطالعه نیستند، با این حال، آزمایش روی موجودات آزمایشگاهی بهتر از آزمایش روی انسان است و دانشمندان را در مسیر صحیح دستیابی به پاسخ نهایی بەخوبى ھدايت مىكند.

- 1- Three-dimensional Model
- 2- Structural model
- 3- Model organisms

مطرح مىشود.





### 🛧 مدل ریاضی

نوع دیگری از مدلها، که میتوان گفت پرکاربردترین مدل در فرایندهای مهندسی و مطالعات علمی محسوب میشود، مدل ریاضی<sup>۱</sup> است. در مدلسازی ریاضی، اطلاعات و دانستههای موجود دربارهٔ پدیدهها به زبان ریاضی ترجمه میشوند و درنهایت، یک مدل ریاضی بهدست میآید. ریاضیات زبانی مختصر با قوانین کاربردی است. یکی از مهمترین مزایای استفاده از مدلسازی ریاضی این است که برای مطالعهٔ یک پدیده به ساخت مدل فیزیکی نیازی ندارد و مطالعه فقط با استفاده از روابط ریاضی، که خواص پدیده را توصیف میکنند، صورت میگیرد. بهره گیری از روابط ریاضی برای مدل کردن یک پدیدهٔ فیزیکی امکان استفاده از رایانه را برای انجام محاسبات عددی فراهم میکند. این امر سبب افزایش چشم گیر سرعت محاسبات، افزایش دقت محاسبات و مطالعات پیچیده با دقت بسیار بالا میشود.

مطالعهٔ حرکت یک پرتابه با در نظر گرفتن عوامل متنوعی مانند گرانش زمین، سرعت اولیه، سرعت باد، زاویه پرتاب و ... مثالی ساده از مدلسازی یک پدیدهٔ فیزیکی با استفاده از روابط ریاضی است که در نتیجهٔ آن بدون نیاز به اندازه گیری تجربی اطلاعات به نسبت دقیقی از مسیر حرکت و سرعت پرتابه در هر مقطع از حرکت آن تا رسیدن به مقصد قابل تعیین است. چنین مطالعه ی با تکیه بر دانش ما از قوانین مکانیک و اصول حرکت، که بهصورت روابط ریاضی قابل تعریف است، صورت می گیرد و درنهایت، اطلاعات دقیقی از مسأله موردنظر به ما می دهد. چنین مدلی می تواند برای طراحی مسیر پرتاپ موشک ماهوارهبر یا فضاپیمای حامل دانشمندان به خارج از کرهٔزمین استفاده شود. بدیهی است که فرایند مطالعهٔ مسیر پرتاب و محاسبه های مربوط به آن بدون استفاده از یک مدل ریاضی دقیق ناممکن است و فرایند پرتاب را با خطرهای بسیاری روبه رو می کند.

معمولاً، در مدلسازی ریاضی با درنظر گرفتن کاربرد مدل و مقدار بیشینهٔ خطای مجاز، از فرضهای ساده کننده برای کاهش پیچیدگی و زمان محاسبات استفاده میشود؛ برای مثال در مسألهای مانند مطالعهٔ حرکت یک توپ فوتبال، میتوان فرض کرد که نیروی مقاومت هوا قابل صرفنظر کردن است یا فرض میشود که پرتابه شکل ذرهای دارد، یعنی تمام وزن پرتابه در یک نقطه از فضا (مرکز جسم) جمع شده است؛ در حالی که در دنیای واقعی چنین نیست. برای مثال اگر یک کاغذ و یک سنگ هموزن از ارتفاع یکسان رها شوند، زمان رسیدن آنها به زمین با یکدیگر برابر نخواهد بود. دلیل این تفاوت تأثیر مقاومت هوا ست که ممکن است در یک مدل ریاضی برای سادهسازی از آن صرفنظر شود. البته، در شرایط حساس و مهم مانند محاسبات مربوط به ساخت هواپیما یا ماهواره، این فرضهای ساده کننده به حداقل میرسند تا محاسبات دقیق باشند.

#### 🔸 اعتبارسنجی یک مدل

معمولاً، در یک پژوهش علمی که با هدف مدلسازی یک پدیده صورت می گیرد، پس از تهیهٔ مدل، پرسشهایی دربارهٔ توانایی مدل برای توصیف دقیق واقعیت مطرح می شود. پرسشهایی از این قبیل که مدل چه میزان از واقعیت را توصیف می کند و چقدر قابل اطمینان است؟ پاسخ به این سؤالات درنهایت، به تأیید یا رد مدل منجر می شود که دراصطلاح، اعتبارسنجی<sup>۲</sup> مدل نام دارد. به طورمعمول، اعتبارسنجی مدل با استفاده از مقایسهٔ نتایج حاصل از مدل و دادههای تجربی موجود انجام می شود. با اعتبار سنجی مدل، میزان خطای آن برای پیش بینی پدیدهٔ موردمطالعه مشخص می شود و اگر این خطا در محدودهٔ قابل قبولی باشد، مدل معتبر تشخیص داده می شود.

اعتبار سنجی مدلهای ریاضی بهراحتی و با استفاده از رابطههای معمول برای محاسبهٔ اختلاف نتایج حاصل از آزمایشهای تجربی و پیشبینی مدل صورت میگیرد. پدیدەهای نانومقیا

مقدمهای بر مدل سازی و

دو رابطهٔ متداول برای محاسبهٔ خطا در بررسی اختلاف میان دادههای تجربی و دادههای پیش بینی شده توسط مدل، خطای نسبی (E<sub>R</sub>)<sup>۱</sup> و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)<sup>۲</sup> است. رابطههای ۱ و ۲ نحوهٔ محاسبهٔ این دو خطا را نشان می دهند.

$$E_R = \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100 \tag{1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$
(7)

در رابطههای فوق مقدار واقعی داده، مقدار پیش بینی شده توسط مدل و n تعداد کل دادههای مقایسه شده است. خطای نسبی، دادههای واقعی و دادههای حاصل از مدل را تک به تک مقایسه می کند و خطای هر نقطه را گزارش می دهد؛ در حالی که خطای جذر میانگین مربعات تصویری کلی از خطای مدل در پیش بینی پدیدهٔ مور دبررسی ارائه می دهد. از این رو، استفاده از خطای جذر میانگین مربعات برای قضاوت دربارهٔ یک مدل مرسومتر است.

برای مثال، صحت یک مدل نیمه تجربی برای بیان رابطهٔ میان دمای ذوب نانوذرات و اندازهٔ آنها را بررسی می کنیم. رابطهٔ ۳ که پیش تر در بخش کاهش دمای ذوب نانوذرات معرفی شد، برای پیش بینی دمای ذوب نانوذرات به عنوان تابعی از دمای ذوب تودهای آن ماده و اندازهٔ ذره ارائه شده است. در این رابطه  $T_m$  دمای ذوب نانوذره،  $T_m$  دمای ذوب تودهای آن ماده، D قطر نانوذره و  $\beta$  ضریبی است که با استفاده از برخی محاسبات ترمودینامیکی که از سطح متن حاضر بالاتر است، به دست میآید.

$$T_m(D) = T_{mb} \left( 1 - \frac{\mu}{D} \right) \tag{(7)}$$

مقدار β برای عنصر بیسموت (Bi) برابر mm ۱/۶ تعیین شده است و دمای ذوب تودهای بیسموت برابر Δ۴۴/۵ K است. جدول ۱ دمای ذوب بهدست آمده از این مدل ریاضی و دمای ذوب اندازه گیری شده برای تعدادی نانوذره را با استفاده از خطای نسبی مقایسه و صحت مدل پیشنهادی را بررسی می کند. داده های ارائه شده در این جدول با یک رقم اعشار گرد شده اند.

جدول ۱: بررسی صحت مدل ارائه شده برای پیشبینی دمای ذوب نانوذرات بهعنوان تابعی از اندازهٔ ذرات و دمای ذوب تودهای آنها						
خطای نسبی پیشبینی (٪)	قدرمطلق خطای پیشبینی (K)	دمای ذوب پیش.ینی شده (K)	دمای ذوب اندازه گیری شده (K)	اندازهٔ نانوذره (nm)		
• / \	٠/۴	۴۵۵/۹	۴۵۵/۵	٩		
٠/٨	٣/٩	491/8	۴۹۵/۵	14/1		
١	۵/۱	۵۱۰/۶	۵ + ۵/۵	۲۰/۲		
• /Y	٣/۴	۵۲۰/۴	۵۱۲	78		
١/٩	٩/٩	۵۲۹/۹	۵۲۰	۳۶		
١/٩	١.	۵۳۳/۴	۵۲۳/۴	47		

1- Relative error

2- Root-mean-square error

مقدمهای بر مدل سازی و شبیه سازی مدمدهای نانومقیاس بنابر دادههای ارائهشده در جدول ۱، این مدل میتواند برای تکتک دادههای آزمایشی موجود، خطای نسبی کمتر از ۲٪ را پیشبینی کند. این امر نشاندهندهٔ دقت بالا و اعتبار مدل برای پیشبینی دمای ذوب نانوذرات بیسموت است. همچنین، مقدار خطای جذر میانگین مربعات برای این مدل برابر K K است که در مقایسه با بزرگی دمای ذوب (از مرتبهٔ چند صد کلوین) مقداری قابلقبول است و بار دیگر، اعتبار مدل را تأیید میکند.

# ا شبیهسازی 🛇

تا اینجا با مفهوم و اهمیت مدلسازی و انواع مدلها آشنا شدید. همچنین، بیان شد که یک مدل راهحلی برای توصیف و توضيح ويژگيهاي يديدهاي است كه تجربهٔ مستقيم آن با مشكلاتي روبهرو است. بهطورخلاصه، استفاده از يک مدل برای بررسی یک پدیده شبیهسازی نامیده می شود؛ درواقع، شبیهسازی کاربرد عملی یک مدل است. شبیهسازی فرایندی است که طی آن از یک مدل، که اعتبار و صحت آن تأیید شده است، برای پیش بینی رفتار یک پدیده استفاده می شود؛ برایناساس، می توان گفت که شبیهسازی آزمایش کردن یک پدیده در دنیای ریاضی است. برای مثال فرض کنید با استفاده از قوانین فیزیک حرکت به رابطهٔ ریاضی ای دست یافته اید که می تواند با داشتن وزن و سرعت یای تمام بازیکنان فوتبال هنگام ضربهزدن به توپ، بیشترین فاصلهای را که توپ فوتبال طی خواهد کرد تخمین بزند. این رابطه یک مدل ریاضی است و استفاده از آن براي تخمين فاصلهٔ طي شده در اثر ضربهٔ هر فردي يک شبيهسازي از فرايند ضربهزدن به توپ فوتبال است. براساس تعريف ارائهشده، شبیهسازی فرایند محاسبهٔ پیش،بینیهای یک مدل به ازای متغیرهای مختلف آن است. قدمت شبیهسازی به پیش از پیدایش پردازش دیجیتال باز می گردد. درواقع، پیش از پیدایش ابزارهای پردازش الکترونیکی، دانشمندان مرحلهٔ شبیهسازی را به صورت دستی انجام میدادند. نیاز به پردازش سریع دادهها و حل سریع معادلات و روابط مختلف ریاضی موجود در مدلها مهمترین نیروی محرکه برای ساخت تجهیزات پردازش الکترونیکی بود. این تجهیزات نسل اول رایانهها بهشمار میروند. شکل ۶ تصویری از دانشمندان ناسا را در روزهای بدون پردازش الکترونیکی (سال ۱۹۶۱ میلادی) و در حال حل دستی معادلات ریاضی برای محاسبه و شبیهسازی مسیر پرتاب یک فضاپیما را نشان میدهد. امروزه، تمام شبیهسازیهای علمی با استفاده از رایانهها صورت میگیرد و دیگر هیچ شبیهسازیای بهصورت دستی انجام نمی شود.



برای بیان بهتر مفهوم شبیهسازی، باردیگر به مثال پیش بینی دمای ذوب نانوذرات برمی گردیم. واضح است که اندازه گیری دمای ذوب نانوذرات با مشکلات بسیاری روبه رو است و هیچ توجیهی برای اندازه گیری این کمیت برای همه نانوذرات وجود ندارد. با این وجود، دمای ذوب نانوذرات دادهٔ بسیار مهمی برای استفادهٔ بهینه از آنهاست. در چنین شرایطی، شبیهسازی به کمک دانشمندان می آید. با استفاده از مدل ریاضی بررسی شده و موردتأیید برای پیش بینی دمای ذوب نانوذرات این کمیت قابل محاسبه است. اگر مقدار خروجی رابطهٔ ۳ برای اندازههای مختلف نانوذرات محاسبه و به صورت منحنی رسم شود، تغییرات دمای ذوب نانوذرات به عنوان تابعی از اندازهٔ نانوذرات شبیه سازی شده است. شکل ۷ منحنی شبیه سازی شده دمای ذوب نانوذرات به عنوان تابعی از اندازهٔ این ذرات نشان می دهد. همچنین، تعدادی شبیه سازی شده دمای ذوب نانوذرات بیسموت را به عنوان تابعی از اندازهٔ این ذرات شده است. شکل ۷ منحنی شبیه سازی شده دمای ذوب نانوذرات بیسموت را به عنوان تابعی از اندازهٔ این ذرات نشان می دهد. همچنین، تعدادی از داده های تجربی موجود برای دمای ذوب نانوذرات بیسموت برای نشان دادن دقت بالای مدل مورداستفاده و نتایج شبیه سازی با استفاده از آن در کنار این منحنی آورده شده اند.

بدیهی است که به دلیل زمان طولانی و هزینهٔ بسیار زیاد چنین آزمایشی، اندازه گیری آنچه از نتایج شبیهسازی حاصل شده ناممکن است. همچنین، در بسیاری موارد حتی در صورت وجود زمان، بودجه و تمایل برای اندازه گیری تجربی دمای ذوب این نانوذرات، امکان انجام این کار بهدلیل محدودیتهای آزمایشگاهی وجود ندارد. اندازه گیری دمای ذوب نانوذرات بسیار کوچک (کمتر از ۸ mm) مثالی از مواردی است که انجام آن در عمل بسیار دشوار است. این در حالی است که مدلسازی و شبیه سازی دمای ذوب، به راحتی و با کمترین هزینه دادههای موردنیاز را در اختیار ما قرار می دهد.



هرچه مدل مورداستفاده دقیقتر تهیه شده باشد، شبیهسازی حاصل از آن دقت بالاتری دارد و به واقعیت نزدیکتر است. معمولاً، چنین مدلهایی فرضهای سادهکنندهٔ کمتری دارند و درنتیجه، تعداد متغیرهای محاسباتی آنها بیشتر است. بیشترشدن متغیرها به معنای پیچیدهترشدن محاسبات و درنتیجه، افزایش هزینه و زمان شبیهسازی است؛ ازاینرو، شبیهسازی با چنین مدلهایی نیازمند توان پردازشی بالاتر و تجهیزات گران قیمت مجاسباتی است.

بسیاری از مدلهای مورداستفاده در محاسبات علمی، که امروزه برای شبیهسازی پدیدههای مختلف به کار میروند، به قدری پیچیده هستند که پردازندههای موجود علی غم سرعت بسیار بالای محاسباتی، بهتنهایی از عهدهٔ پردازش آنها در مدت زمان معقول بر نمی آید. راهحل پژوهشگران برای کوتاه کردن زمان محاسبات، اتصال تعداد بسیار زیادی از پردازندهها به یکدیگر و تقسیم بار محاسبات بین هر یک از آنهاست. چنین ساختارهای عظیم پردازشی دراصطلاح، ابررایانه ( نامیده می شوند. امروزه، ابررایانه ها در مدت زمان بسیار کوتاه، محاسبات پیچیده ای می کنند که ممکن است

ن است

مفاهيم اوليه فناوري نانو و كاربردهاي آن در فيزيك

177

Per-logo

1- Supercomputer

انجام آن با استفاده از رایانههای معمولی به بیش از یک قرن زمان نیاز داشته باشد. این ابررایانهها انواع شبیهسازیهای دقیق علمی را بهراحتی ممکن میکنند. شکل ۸ تصویری از یک ابررایانه به نام تایهولایت<sup>1</sup> را در مرکز ملی ابررایانه کشور چین<sup>۲</sup> نشان میدهد که تا اوایل سال ۲۰۱۸ میلادی، قدرتمندترین ابررایانهٔ جهان به شمار میرفت. این ابررایانه ۱۰٫۶۴۹٫۶۰۰ واحد پردازش (CPU)<sup>۲</sup> دارد؛ این در حالی است که یک رایانهٔ شخصی معمولی فقط دارای یک واحد پردازش است.



شکل ۸: (آ) تصویری از بخشهایی ابررایانهٔ تایهولایت و (ب) تصویری از کابلهای اتصال درون آن [۸۹]

گاهی مدلها به اندازهای پیچیده می شوند که حتی در صورت اتصال تمام پردازندههای موجود در دنیا هم، شبیه سازی آنها در مدتزمان قابل قبول امکان پذیر نیست. شاید تصور شود که امکان وجود چنین مدلی بسیار غیر محتمل است اما می توان مثالهای متعددی از این مدل ها معرفی نمود؛ برای مثال، DNA موجود در کروموزوم شمارهٔ ۱ انسان حدود ۵۰۰ میلیون باز آلی دارد و هر باز آلی دارای بیش از ۱۰ اتم است (بازهای آلی مختلف تعداد اتم های متفاوتی دارند). \* با یک محاسبهٔ تقریبی ۵ میلیارد اتم خواهیم داشت که در صورت مدل سازی حرکت آنها در سه راستا و با در نظر گرفتن نوع پیوندهای موجود تعداد متغیرهای مدل چیزی حدود ۲۰ میلیارد متغیر خواهد بود (برای ساده شدن محاسبات فرض کنید که فقط یک نوع پیوند برای اتصال تمام اتم های دنیا لازم است) (شکل ۹). این تعداد محاسبه فقط برای پیش بینی یک برهم کنش ساده بین اتمها بود و امکان شبیه سازی رفتار چنین پدیدهای، حتی برای چند پیکوثانیه، از توان پرداز شی جهان خارج است.



شکل ۹: محاسبات تقریبی مرتبط با شبیه سازی کروموزوم شمارهٔ ۱ انسانی

در چنین شرایطی، معمولاً پژوهشگران سادهسازی مدل را آغاز میکنند و با روشهای خلاقانه تعداد متغیرهای مدل را کاهش میدهند. درواقع، پژوهشگران علوم محاسباتی همواره در حال یافتن راهحلی برای ایجاد تعادل بین دقت و پیچیدگی مدل هستند. چگونگی انجام این سادهسازیها ارتباط مستقیمی با نوع مدل دارد و با درنظرگرفتن فیزیک و شرایط حاکم بر پدیدهٔ موردمطالعه انجام میشوند.

<sup>1-</sup> TaihuLight

<sup>2-</sup> National Supercomputer Center in Guangzhou

<sup>3-</sup> Central processing unit

💿 شبیه سازی دینامیک مولکولے

شبیه سازی دینامیک مولکولی (MD)<sup>۱</sup>، یکی از شناخته شده ترین روش های شبیه سازی در ابعاد اتمی و مولکولی است. ویژگی خاص این روش در فرض های ساده کننده ای است که دربارهٔ ماهیت و نحوهٔ برهمکنش ها اتمها و مولکول ها در نظر می گیرد. در این روش، اتمها به عنوان گوی هایی سخت فرض می شوند. علت این موضوع به نیروی دافعهٔ بین ابر الکترونی دو اتم باز می گردد. در شبیه سازی دینامیک مولکولی، فرض بر این است که میان اتمها و مولکول ها برهم کنش های کوتاه برد، که توسط پتانسیل لنارد-جونز توصیف می شود، وجود دارد<sup>۲</sup>. از این رو، فرض می شود که هستهٔ هر اتم، ابر الکترونی اتمهای دیگر را به خود جذب می کند و ابرهای الکترونی اتمها یکدیگر را دفع می کنند. براساس این فرض، اتمها در یک فاصلهٔ تعادلی قرار دارند و درصورت دور شدن از هم، توسط نیروهای جاذبه به یکدیگر نزدیک می شوند و درصورت نزدیک شدن بیش از حد، توسط نیروهای دافعه از یکدیگر دور می شوند. برای مطالعهٔ رفتار اتمها در نزدیکی یکدیگر و با استفاده از چنین برهم کنش هایی نیاز چندانی به بررسی ساختار درونی اتم وجود ندارد؛ بنابراین، می توان به راحتی آنها را به صورت گوی های سخت فرض کرد. باید این نکته را مدنظر قرار داد که این فرض را دان در بنابراین ایموان به در احتی آنها را به صورت گوی های سخت فرض کرد. باید این نکته را مدنظر قرار داد که این فرض در بسیاری از موارد

یکی از ساده کننده ترین فرضها درنظر گرفتن پیوندهای بین اتمی به عنوان فنر است که با توجه به ماهیت پیوندهای شیمیایی میان انواع اتمها برای توصیف انواع پیوندهای شیمیایی ارائه شده است. دلیل چنین فرضی این است که اتمها همواره فاصله ی تعادلی نسبت به هم در حال نوسان اند؛ مانند دو توپ که با یک فنر به هم متصل اند. در شبیه سازی دینامیک مولکولی هم پیوندهای بین اتمها به شکل فنر درنظر گرفته می شوند؛ به این ترتیب می توان انرژی هر پیوند را به کمک روابط انرژی فنر محاسبه کرد. شکل ۱۰ طرحی از مدل توپ و فنر برای یک مولکول دو اتمی را نشان می دهد که اتمها در فاصلهٔ ۲۰ در حالت تعادل (کمترین سطح انرژی پتانسیل) قرار دارند. اطلاعات مربوط به پیوندهای اتمی و به بیان ساده، همان ثابتهای فنر مورداستفاده برای شبیه سازی دینامیک مولکولی از طریق آزمایشهای فراوان تعیین می شوند. با افزایش تعداد اتمها در یک مولکول و پیچیده تر شدن ساختار آن، محاسبهٔ انرژی ساختار هم با پیچیدگیهای بسیاری همراه می شود. با این حال، با انواع ساده سازیها و با تکیه بر فرض توپ و فنر، این ساختارهای پیچیده هم با استفاده از حالتهای ساده ازی شده نوسان خمشی و پیچشی قابل محاسبه می شوند (شکل ۱۱).



مقدمهای بر مدلسازی و شبیهسازی

محسال يلاج

1- Molecular dynamic



شکل ۱۱: طرحی از نوسآنهای درون مولکولی (آ) خمشی و (ب) پیچشی [۹۰]

در شبیه سازی دینامیک مولکولی، متغیرهای اولیه، مانند سرعت و شتاب اولیهٔ اتمها، با استفاده از یک حدس اولیه تعیین می شوند. مقادیر چنین حدسی معمولاً به صورت تصادفی و با تکیه بر تجربهٔ شخصی انتخاب می شود. در ادامه، محاسبهٔ میزان و جهت جابه جایی اتمها بر پایهٔ محاسبهٔ روابط فیزیک نیوتونی صورت

می گیرد. این بدان معنی است که در هر مرحله از محاسبات شبیه سازی، موقعیت جدید هریک از اتم ها براساس موقعیت فعلی آنها و نیروهای تعیین شده بین اتم های مختلف، که به ثابت های فنر تعیین شده وابسته است، محاسبه می شود. همچنین، در هر مرحله از محاسبات، با جمع کردن انرژی پتانسیل تک تک اجزای مجموعهٔ موردمطالعه، انرژی کل مجموعه محاسبه می گردد. تا زمانی که انرژی کل مجموعه به یک مقدار حداقل برسد (دستیابی به حالت تعادل)، محاسبات ادامه می یابد. بر این اساس، می توان با استفاده از شبیه سازی دینامیک مولکولی روند تغییرات یک مجموعهٔ یا پدیده را با گذر زمان بررسی کرد.

در چنین شبیهسازیهایی، اگر تعداد ذرات موجود در مجموعهٔ موردمطالعه زیاد شود، محاسبات به شدت افزایش مییابد که به ایجاد مشکلاتی بسیاری ازجمله افزایش هزینههای پردازش منجر میشود. برای حل این مشکل و سادهسازی مدل، سه راهحل کلی پیشنهاد میشود: نخستین راهحل استفاده از هنگرد<sup><sup>۲</sup> کوچک با تعداد محدودی اتم یا مولکول از مجموعهٔ اصلی است. درشتدانهسازی<sup>۲</sup> و استفاده از فاصلهٔ قطع<sup>۳</sup> راهحلهای دیگر کاهش هزینههای پردازش محسوب میشوند.</sup>

در بسیاری از پدیدههایی که به شبیهسازی نیاز دارند، نمونهٔ واقعی موردمطالعه از تعداد بسیار زیادی اتم و مولکول تشکیل شده است. در چنین مواردی، اگر کل ساختار عیناً شبیهسازی شود، محاسبات بسیار حجیم شده و هزینهٔ بسیاری در پی خواهد دشت. راهحل پژوهشگران استفاده از نمونهای کوچک از ساختار موردمطالعه است که میتواند نمایندهٔ ساختار اصلی باشد؛ برای مثال، ساختار متخلخلی را در نظر بگیرید که از آن بهعنوان فیلتر استفاده میشود (شکل ۱۲). این فیلتر ساختاری کاملاً تکراری دارد و میتوان بهراحتی بخش کوچکی از آن را بهعنوان نمایندهای از کل ساختار درنظر گرفت. در بسیاری از موارد، در شبیهسازی دینامیک مولکولی، این امکان وجود دارد که بخش کوچکی از ساختار موردمطالعه بهعنوان نمایندهای از کل ساختار، شبیهسازی شود و نتایج حاصل به کل مجموعه تعمیم داده شود.



شکل ۱۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی از یک فیلتر متخلخل با ساختار منظم [۹۱]

1- Ensemble

2- Coarse graining

3- Cut-off distance
چنین نمایندهای که نتایج شبیهسازی آنرا میتوان به کل مجموعه تعمیم داد، در اصطلاح هنگرد نامیده میشود. یک هنگرد در فرایندهای شبیهسازی، مجموعهای از تمام اجزای متفاوت پدیدهٔ مورد مطالعه است؛ این امر موجب میشود تا تمامی حالتهای ممکن پدیدهٔ مورد مطالعه شبیهسازی شده و نتایج حاصل قابل تعمیم برای کل مجموعه باشد، بدون آنکه نیاز به شبیهسازی کل اجزای آن باشد.

## 🔸 درشتدانهسازی

در مثال کروموزوم شمارهٔ ۱ انسانی، مهمترین دلیل پیچیدگی شدید مدل، تعداد زیاد اتمهای موجود در هر باز آلی بود. در چنین مواردی، خود نمونهٔ آماری شامل تعداد زیادی اتم و مولکول است و شبیهسازی آن به محاسبات پیچیدهای نیاز دارد. در این موارد، باید از ترفندهای دیگری برای کاهش حجم محاسبات استفاده شود. اگر هر باز آلی ذرهای مستقل در نظر گرفته شود، یعنی تمام اتمهای موجود در آن به صورت یک مجموعهٔ کلی فرض شود و شبیهسازی مدل بر این اساس صورت گیرد، می بینیم که تعداد محاسبات موردنیاز برای شبیهسازی کم می شود و در نتیجه، مدت زمان انجام کل محاسبات بسیار کاهش می یابد. هر کدام از این مجموعها یک در شتدانه نامیده می شوند.

در چنین شرایطی، از برهم کنشهای موجود بین اتمهای هر درشتدانه و تأثیر جزئی آنها بر کل سامانه صرفنظر می شود. در این حالت، به جای بررسی برهم کنش تک تک اتمهای تشکیل دهندهٔ یک باز آلی با محیط پیرامون، از یک مقدار متوسط استفاده می شود که برآیند همهٔ اجزای تشکیل دهنده است. این عمل حجم محاسبات را بسیار کاهش می دهد. این موضوع باعث ساده سازی مدل و افزایش سرعت شبیه سازی می شود اما باید توجه کرد که اگر چنین اقدامی به درستی انجام نشود، ممکن است دقت شبیه سازی را بکاهد. شکل ۱۳ روند در شتدانه سازی برای یک مولکول مجموعهٔ آلی را نشان می دهد. با مقایسهٔ ساختارهای ساده سازی شده در شکل ۱۳ و ساختار اصلی می توانید دربارهٔ صحت و اعتبار شبیه سازی قضاوت کنید.



پس از درشتدانهسازی، باید ویژگیهای درشتدانه، بهعنوان ذرهای مستقل، مجددا تعریف شود. با توجه به ماهیت درشتدانهها، امکان بررسی مستقل آنها وجود ندارد؛ ازاینرو، ویژگیهایی مانند بار الکتریکی، توانایی برقراری پیوند و نحوهٔ برهمکنش با محیط پیرامون درشتدانهها معمولاً به کمک روشهای محاسباتی به دست میآید.

کے لیے تھے۔ مالی بر مدلسازی و شبیعساز پدیددھای نانومقیاس

مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك

## 🔶 فاصلهٔ قطع

همان طور که پیشتر اشاره شد، در مدل سازی و شبیه سازی دینامیک مولکولی رفتار مولکول های موجود در یک مجموعه بر اساس موقعیت و برهم کنش هر یک از اتم ها یا مولکول ها انجام می شود؛ در نگاه نخست، به این معنی است که حین شبیه سازی، برهم کنش های موجود بین دورترین مولکول ها هم باید بررسی و محاسبه شود (شکل ۱۴– آ). که حین شبیه سازی، برهم کنش های موجود بین دورترین مولکول ها هم باید بررسی و محاسبه شود (شکل ۱۴– آ). ولی می دانیم که برهم کنش های موجود میان تک تک اتم ها و مولکول ها یم موجود در یک شبیه سازی دینامیک مولکولی ا ولی می دانیم که برهم کنش های موجود میان تک تک اتم ها و مولکول های موجود در یک شبیه سازی دینامیک مولکولی از نوع برهم کنش های موجود میان تک تک اتم ها و مولکول های موجود در یک شبیه سازی دینامیک مولکولی از نوع برهم کنش های موجود میان تک تک اتم ها و مولکول های موجود در یک شبیه سازی دینامیک مولکولی از نوع برهم کنش ها و نیروهای مؤثر میان دو ذره از نوع برهم کنش کوتاه برد است. درنتیجه، از یک فاصلهٔ مشخص به بعد، برهم کنش ها و نیروهای مؤثر میان دو ذره بعقدری ناچیز می شود که قابل چشم پوشی است. در صورت نادیده گرفتن این واقعیت در حین شبیه سازی، محاسبات مهم به بعر وری بسیاری، که تأثیر ناچیزی در خروجی شبیه سازی دارند، انجام خواهد گرفت؛ در حالی که این محاسبات سهم به سازی در زمان و هزینهٔ شبیه سازی دارند.

برای اجتناب از محاسبات بیهوده در شبیهسازی دینامیک مولکولی، فاصلهای موسوم به فاصلهٔ قطع تعریف می شود. براین اساس، فرض می شود که تمام ذراتی که دورتر از این فاصله از هم قرار دارند، هیچ برهم کنشی با یکدیگر ندارند (شکل ۱۴– ب). ازاین رو، در فاصله ای کمتر از فاصلهٔ قطع برهم کنش بین اتمها یا مولکول ها چشم گیر است و باید به آن توجه کرد. فاصلهٔ قطع مختص مدل سازی دینامیک مولکولی نیست و در سایر مدل ها هم از آن استفاده می شود و یکی از پرکاربردترین روش های ساده سازی در حوزهٔ شبیه سازی است.



## 🖲 شبیه سازی کوانتومے

دینامیک مولکولی یکی از روشهای موجود برای شبیهسازی پدیدههای رخداده در ابعاد اتمی و مولکولی است. همان طور که بیان شد، این روش قوانین فیزیک نیوتونی (فیزیک کلاسیک) را حاکم بر دنیای اتمها و مولکولها فرض می کند؛ این در حالی است که میدانیم قوانین مکانیک کوانتوم بر دنیای اتمها و مولکولها حاکم است. چنین فرضی موجب می شود که نتایج حاصل از شبیه سازی دینامیک مولکولی در برخی موارد با خطای قابل ملاحظهای داشته باشد. به همین دلیل، اقدامات بسیاری برای استفاده از قوانین مکانیک کوانتوم به منظور توصیف برهم کنش اتمها و مولکولها و شبیه سازی پدیدههای مختلف صورت گرفته است. از این روشهای شبیه سازی نتایج دقیق تری، در مقایسه با دینامیک مولکولی، حاصل می شود ولی به دلیل معادلات بسیار پیچیده، زمان و هزینهٔ محاسباتی بسیار بالایی به بار می آید؛ به نحوی که این شبیه سازیها با استفاده از ابرایانه ها قابل انجاماند.

در شبیهسازیهایی که با تکیه بر مکانیک کوانتوم صورت میگیرد، برهمکنش میان اتمها و مولکولها با استفاده از محاسبات صورت میگیرد که به برهمکنش الکترونهای اتمها با الکترونهای اتمهای دیگر و هستهٔ اتمها، با درنظرگرفتن رفتار موجی الکترونها، مربوط است. این امر نیازمند حل معادلات بسیار پیچیده برای توصیف رفتار موجی الکترون است. در صورت عدماستفاده از فرضهای سادهکننده، حل چنین معادلاتی بسیار پرهزینه و طولانی خواهد بود. ازاینرو، فرضهای سادهکنندهٔ بسیاری برای کاهش حجم محاسبات استفاده میشود.

بر اساس نوع فرضهای ساده کنندهای که برای حل معادلات موج الکترون در شبیه سازیهای کوانتومی استفاده می شود، روشهای مختلفی برای شبیه سازی پدیده ها معرفی شده است. در میان این روشها، روشی موسوم به نظریهٔ تابعی چگالی (DFT)<sup>۱</sup> رایج است. این روش از فرضهای ساده کننده ای استفاده می کند که خطای کمی در نتایج محاسبات دارند و به همین دلیل به یکی پرطرفدارترین روش شبیه سازی پدیده ها در ابعاد اتمی و مولکولی تبدیل شده است؛ به نحوی که امروزه، اکثر شبیه سازی ها برای مطالعهٔ نانومواد و پدیده ها در ابعاد اتمی و مولکولی تبدیل شده است؛ روش DFT به جای حل معادلهٔ موج الکترون برای تک تک الکترون های یک اتم، مفهوم چگالی الکترون در اطراف اتم را مطرح می سازد و تأثیر تک تک الکترون های اتم را در تابع چگالی الکترون خلاصه می کند. این امر موجب می شود که حجم محاسبات بسیار کاهش یابد، بدون اینکه خطای قابل ملاحظه ای در نتایج نهایی حاصل شود.

امروزه، روش نظریهٔ تابعی چگالی پرکاربردترین و پرطرفدارترین روش شبیهسازی برای مطالعهٔ خواص انواع نانومواد است. این روش ابزاری توانمندی برای مطالعه و شبیهسازی پدیدهها در ابعاد اتمی و مولکولی فراهم کرده است.

مفاهيم اوليه فناورى نانو و كاربردهاى آن در فيزيك

١٨٣

1. Kaushik. Lycurgus Cup: A Piece of Ancient Roman Nanotechnology. December 2018; Available from: <u>https://www.amusingplanet.com/2016/12/lycurgus-cup-piece-of-ancient-roman.html</u>.

- Mc Carthy, D.J., et al., Nanoparticles and the Blood-Brain Barrier: Advancing from In-Vitro Models Towards Therapeutic Significance. Pharmaceutical Research, 2015. 32(4): p. 1161-1185.
- Zaman, M., et al., Nanoparticles in relation to peptide and protein aggregation. International Journal of Nanomedicine, 2014. 9(1): p. 899-912.
- Zrazhevskiy, P., M. Sena, and X. Gao, Designing multifunctional quantum dots for bioimaging, detection, and drug delivery. Chemical Society Reviews, 2010. 39(11): p. 4326-4354.
- Goldberger, J., et al., Silicon Vertically Integrated Nanowire Field Effect Transistors. Nano Letters, 2006. 6(5): p. 973-977.
- Panda, P.K. and S. Ramakrishna, Electrospinning of alumina nanofibers using different precursors. Journal of Materials Science, 2007. 42(6): p. 2189-2193.
- Sun, K.-C., et al., Synthesis and characterization of highly ordered TiO<sub>2</sub> nanotube arrays for hydrogen generation via water splitting. Materials Chemistry and Physics, 2011. 129(1): p. 35-39.
- Graphene Discovery Leads to Top Physics Prize. 2006 December 2018; Available from: <u>https://www.photonics.com/Articles/Graphene Discovery Leads to Top Physics Prize/a27116</u>.
- Karuppiah, J., E.L. Reddy, and Y.S. Mok, Anodized aluminum oxide supported NiO-CeO<sub>2</sub> catalyst for dry reforming of propane. Catalysts, 2016. 6(10).
- Zhu, C., et al., Investigation of the shear response and geometrically necessary dislocation densities in shear localization in high-purity titanium. International Journal of Plasticity, 2017. 92: p. 148-163.
- Gold nanoparticles dispersed in water. December 2018; Available from: <u>https://commons.wikimedia.org/wiki/</u> <u>File:Au\_nanoparticles.jpg</u>.
- Tang, H., et al., Classical strong metal–support interactions between gold nanoparticles and titanium dioxide. Science Advances, 2017. 3(10): p. e1700231.
- Krauss, T.D. and J.J. Peterson, Electronic structure and optical transitions in colloidal semiconductor nanocrystals, in Colloidal Quantum Dot Optoelectronics and Photovoltaics, E.H. Sargent and G. Konstantatos, Editors. 2013, Cambridge University Press: Cambridge. p. 59-86.
- Cui, X., et al., Bridging homogeneous and heterogeneous catalysis by heterogeneous single-metal-site catalysts. Nature Catalysis, 2018. 1(6): p. 385-397.
- Quantum Dots & Nanoparticles. December 2018; Available from: <u>https://archive.education.mrsec.wisc.edu/background/quantum\_dots/</u>.
- Vincenzo, A., et al., Surface plasmon resonance in gold nanoparticles: a review. Journal of Physics: Condensed Matter, 2017. 29(20): p. 203002.
- Mody, V., et al., Introduction to metallic nanoparticles. Journal of Pharmacy And Bioallied Sciences, 2010. 2(4): p. 282-289.
- Kinoshita, S., S. Yoshioka, and J. Miyazaki, Physics of structural colors. Reports on Progress in Physics, 2008. 71(7): p. 076401.
- Yoshioka, S., 6 Structural Color in Nature: Basic Observations and Analysis, in Pattern Formations and Oscillatory Phenomena, S. Kinoshita, Editor. 2013, Elsevier: Boston. p. 199-251.
- 20. History and application of silver. December 2018; Available from: http://silverpower.eu/knowledge-base.
- Qu, Y.D., et al., Size-dependent cohesive energy, melting temperature, and Debye temperature of spherical metallic nanoparticles. Physics of Metals and Metallography, 2017. 118(6): p. 528-534.

- Mehrmohammadi, M., et al., Enhanced pulsed magneto-motive ultrasound imaging using superparamagnetic nanoclusters. Nanotechnology, 2011. 22(4).
- 23. McNally, P.J., 3D imaging of crystal defects. Nature, 2013. 496: p. 37.
- Zhou, Y.T., et al., Strain-induced preferential dissolution at the dislocation emergences in MnS: an atomic scale study. Philosophical Magazine, 2015. 95(22): p. 2365-2375.
- First working transistor, 1947. Deember 2018; Available from: <u>http://www.inventingeurope.eu/story/blind-ed-by-success&object</u>.
- 26. Replica of IC. December 2018; Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Replica\_IC.png.
- 27. Scholz, P., Focused Ion Beam Created Refractive and Diffractive Lens Techniques for the Improvement of Optical Imaging through Silicon, in Elektrotechnik und Informatik. Technische Universität Berlin: Berlin.
- Hofmann, T., J. Welker, and F.J. Giessibl, Preparation of light-atom tips for scanning probe microscopy by explosive delamination. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2010. 28(3): p. C4E28-C4E30.
- 29. Chaste, J., et al., Single Carbon Nanotube Transistor at GHz Frequency. Nano Letters, 2008. 8(2): p. 525-528.
- Rhys Alun, G., et al., Directed self-assembly of block copolymers for use in bit patterned media fabrication. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013. 46(50): p. 503001.
- Albrecht, T.R., et al., Bit-Patterned Magnetic Recording: Theory, Media Fabrication, and Recording Performance. IEEE Transactions on Magnetics, 2015. 51(5): p. 1-42.
- Lunt, B.M., D. Hansen, and M.R. Linford, Permanent Storage for Digital Photos. International Symposium on Technologies for Digital Photo Fulfillment, 2012. 2012(1): p. 7-12.
- Hwu, E.E.-T. and A. Boisen, Hacking CD/DVD/Blu-ray for Biosensing. ACS Sensors, 2018. 3(7): p. 1222-1232.
- Mohd Jani, J., et al., A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. Materials & Design (1980-2015), 2014. 56: p. 1078-1113.
- 35. Behl, M. and A. Lendlein, Shape-memory polymers. Materials Today, 2007. 10(4): p. 20-28.
- Bormann, T., et al. Determination of strain fields in porous shape memory alloys using micro-computed tomography. in SPIE Optical Engineering + Applications. 2010. SPIE.
- Rödel, J. and J.-F. Li, Lead-free piezoceramics: Status and perspectives. MRS Bulletin, 2018. 43(8): p. 576-580.
- Murphy, E.B. and F. Wudl, The world of smart healable materials. Progress in Polymer Science, 2010. 35(1): p. 223-251.
- Blaiszik, B.J., N.R. Sottos, and S.R. White, Nanocapsules for self-healing materials. Composites Science and Technology, 2008. 68(3): p. 978-986.
- Pramanik, N.B., et al., A new class of self-healable hydrophobic materials based on ABA triblock copolymer via RAFT polymerization and Diels-Alder "click chemistry". Polymer, 2017. 119: p. 195-205.
- Raliya, R., et al., Non-invasive aerosol delivery and transport of gold nanoparticles to the brain. Scientific Reports, 2017. 7: p. 44718.
- 42. Microscopy Australia. December 2018; Available from: https://myscope.training.
- Extended Depth of Field (EDF), Deep Focus Imaging Module. December 2018; Available from: <u>https://www.meyerinst.com/digital/microscopy-system-integration</u>.
- 44. The Wave Behavior of Matter. December 2018; Available from: https://chem.libretexts.org/.
- Henning, S. and R. Adhikari, Chapter 1 Scanning Electron Microscopy, ESEM, and X-ray Microanalysis, in Microscopy Methods in Nanomaterials Characterization, S. Thomas, et al., Editors. 2017, Elsevier. p. 1-30.

۱۸۵

- Su, D., Advanced electron microscopy characterization of nanomaterials for catalysis. Green Energy & Environment, 2017. 2(2): p. 70-83.
- Inkson, B.J., 2 Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization, in Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods, G. Hübschen, et al., Editors. 2016, Woodhead Publishing, p. 17-43.
- Travessa, D.N., et al., Ag ion decoration for surface modifications of multi-walled carbon nanotubes. Materials Research, 2014. 17(3): p. 687-693.
- Krumeich, F. The Electron Microscopy Site. December 2018; Available from: <u>http://www.microscopy.ethz.</u> ch/elmi-home.htm.
- Kouamé, N.A., et al., Visible light-induced photocatalytic activity of modified titanium(iv) oxide with zero-valent bismuth clusters. New Journal of Chemistry, 2015. 39(3): p. 2316-2322.
- Ophus, C., et al., Efficient linear phase contrast in scanning transmission electron microscopy with matched illumination and detector interferometry. Nature Communications, 2016. 7: p. 10719.
- Zhang, X., et al., Optical properties of SiO<sub>2</sub>@M (M = Au, Pd, Pt) core-shell nanoparticles: material dependence and damping mechanisms. Journal of Materials Chemistry C, 2015. 3(10): p. 2282-2290.
- Khodashenas, B. and H.R. Ghorbani, Synthesis of silver nanoparticles with different shapes. Arabian Journal of Chemistry, 2015.
- Koehler, J.M., N. Visaveliya, and A. Knauer, Controlling formation and assembling of nanoparticles by control of electrical charging, polarization, and electrochemical potential. Nanotechnology Reviews, 2014. 3(6): p. 553-568.
- de Vlieger, D.J.M., L. Lefferts, and K. Seshan, Ru decorated carbon nanotubes a promising catalyst for reforming bio-based acetic acid in the aqueous phase. Green Chemistry, 2014. 16(2): p. 864-874.
- Li, S.Q., R.P.H. Chang, and L.E. Ocola. TCO Nanostructures as building blocks for nanophotonic devices in the infrared. in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2013.
- Wang, M., et al., Solvent-controlled crystallization of zinc oxide nano(micro)disks. Journal of Crystal Growth, 2008. 310(6): p. 1213-1219.
- Sriamornsak, P. and N. Thirawong, Use of back-scattered electron imaging as a tool for examining matrix structure of calcium pectinate. International Journal of Pharmaceutics, 2003. 267(1): p. 151-156.
- Raduta, B. 25 Amazing Electron Microscope Images. December 2018; Available from: <u>http://www.topdesign-mag.com/25-amazing-electron-microscope-images</u>.
- Esparza, R., et al., Study of PtPd bimetallic nanoparticles for fuel cell applications. Materials Research, 2017. 20(5): p. 1193-1200.
- Dukhno, O., et al., Quantitative assessment of energy transfer in upconverting nanoparticles grafted with organic dyes. Nanoscale, 2017. 9(33): p. 11994-12004.
- Fan, W., et al., Polystyrene-based Hollow Microsphere Synthesized by γ-ray Irradiation-assisted Polymerization and Self-Assembly and Its Application in Detection of Ionizing Radiation. Scientific Reports, 2017. 7: p. 41876.
- Matysiak, H., et al., Microstructure of haynes<sup>®</sup> 282<sup>®</sup> superalloy after vacuum induction melting and investment casting of thin-walled components. Materials, 2013. 6(11): p. 5016-5037.
- Oleshko, V.P., et al., Miniature all-solid-state heterostructure nanowire Li-ion batteries as a tool for engineering and structural diagnostics of nanoscale electrochemical processes. Nanoscale, 2014. 6(20): p. 11756-11768.
- Irving, M. Does quantum tunneling take time or is it instantaneous? December 2018; Available from: <u>https://newatlas.com/time-electron-quantum-tunneling/50784/</u>.
- 66. Ju, B.-F., Y.-L. Chen, and Y. Ge, The art of electrochemical etching for preparing tungsten probes with controllable tip profile and characteristic parameters. Review of Scientific Instruments, 2011. 82(1): p. 013707.

- Richard, L., et al., Interpreting the probe-surface interaction of surface measuring instruments, or what is a surface? Surface Topography: Metrology and Properties, 2014. 2(3): p. 035001.
- Kim, J., et al., Visualization of geometric influences on proximity effects in heterogeneous superconductor thin films. Nature Physics, 2012. 8: p. 464.
- Mayne, A.J. and G. Dujardin, Chapter 14 STM Manipulation and Dynamics, in Handbook of Surface Science, E. Hasselbrink and B.I. Lundqvist, Editors. 2008, North-Holland. p. 681-759.
- Kim, H.J., et al., Structural phase transitions of Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> cells with TiN electrodes using a homemade W heater tip. Applied Physics Letters, 2007. 90(8): p. 083103.
- 71. Peter Eaton, P.W., Atomic Force Microscopy. 2010: Oxford University Press. 288.
- Al-Musawi, R.S.J., et al., Insight into mechanics of AFM tip-based nanomachining: bending of cantilevers and machined grooves. Nanotechnology, 2016. 27(38): p. 385302.
- Rao, S. and K.D. Costa, 2 Atomic Force Microscopy (AFM) in biomedical research, in Biomedical Imaging, P. Morris, Editor. 2014, Woodhead Publishing. p. 41-64.
- de Oteyza, D.G., et al., Direct Imaging of Covalent Bond Structure in Single-Molecule Chemical Reactions. Science, 2013. 340(6139): p. 1434-1437.
- Zhang, J., et al., Real-Space Identification of Intermolecular Bonding with Atomic Force Microscopy. Science, 2013. 342(6158): p. 611-614.
- Shen, J., et al., AFM tip-sample convolution effects for cylinder protrusions. Applied Surface Science, 2017. 422: p. 482-491.
- 77. An, T., et al., Fabrication of functional micro- and nanoneedle electrodes using a carbon nanotube template and electrodeposition. Nanoscale Research Letters, 2011. 6(1): p. 306.
- Mai, W. Fundamental Theory of Atomic Force Microscopy. December 2018; Available from: <u>http://www.nanoscience.gatech.edu/zlwang/research/afm.html</u>.
- Atomic force microscopy. December 2018; Available from: <u>https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic\_force\_microscopy</u>.
- TipCheck sample for checking AFM tips. December 2018; Available from: <u>https://www.microtonano.com/</u> <u>AFM-tip-check-and-test-sample-tipcheck.php</u>.
- Geerlings, J., et al., Design and fabrication of in-plane AFM probes with sharp silicon nitride tips based on refilling of anisotropically etched silicon moulds. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2014. 24(10): p. 105013.
- Liu, H.-C., G.A. Dahlen, and J.R. Osborne, Critical Dimension Atomic Force Microscopy for Sub-50-nm Microelectronics Technology Nodes, in Applied Scanning Probe Methods VIII: Scanning Probe Microscopy Techniques, B. Bhushan, H. Fuchs, and M. Tomitori, Editors. 2008, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 31-75.
- Krishnamurthy, S., et al., Yucca-derived synthesis of gold nanomaterial and their catalytic potential. Nanoscale Research Letters, 2014. 9(1): p. 627.
- Greer, H.F. and W. Zhou, Electron diffraction and HRTEM imaging of beam-sensitive materials. Crystallography Reviews, 2011. 17(3): p. 163-185.
- Kolonits, T., et al., Characterization of defect structure in electrodeposited nanocrystalline Ni films. Journal of the Electrochemical Society, 2016. 163(3): p. D107-D114.
- Scherer, G. IPCC Predictions: Then Versus Now. December 2018; Available from: <u>http://www.climatecentral.org/news/ipcc-predictions-then-versus-now-15340</u>.
- Barnstorff, K. NASA to Shine Lasers on Future Aircraft Concept. December 2018; Available from: <u>https://www.nasa.gov/feature/langley/nasa-to-shine-lasers-on-future-aircraft-concept</u>.
- 88. Model Organisms. December 2018]; Available from: https://www.pbslearningmedia.org/resource/hew06.sci.

١٨Y

life.gen.modelorg/model-organisms.

- China's Sunway-TaihuLight named world's fastest supercomputer. December 2018; Available from: <u>http://</u> english.gov.cn/news/photos/2016/06/20/content\_281475376099575.htm.
- Kristyna, P. and A.B. Rainer, Biomembranes in atomistic and coarse-grained simulations. Journal of Physics: Condensed Matter, 2015. 27(32): p. 323103.
- Cong, H., et al., Preparation of a highly permeable ordered porous microfiltration membrane of brominated poly(phenylene oxide) on an ice substrate by the breath figure method. Soft Matter, 2012. 8(34): p. 8835-8839.

بـرای مطالعــه مفاهیــم پایــهای یــا کســب اطلاعــات بیشــتر در مــورد مطالبــی کــه در متــن کتــاب بــا علامــت \* مشـخص شــدهاند میتوانیــد بــه منابــع زیــر مراجعــه نماییــد.

بخش	فصل	پايە	ارجاع به کتاب	عنوان
_	اول	دهم	شيمي دبيرستان	يون و يونيزاسيون
_	اول	دهم	شيمي دبيرستان	پيوند يونى
_	اول	دهم	شيمي دبيرستان	پيوند اشتراكي (كووالانسي)
_	اول	دهم	شيمي دبيرستان	پيوند فلزى
_	سوم	دهم	شيمي دبيرستان	مولكول قطبى
فولرينها	چهارم	_	مفاهیم اولیه فناوری نانو و کاربردهای آن در شیمی	فولرينها
نانوحسگر	پنجم	-	مفاهیم اولیه فناوری نانو و کاربردهای آن در شیمی	نانوحسگر
الكتروريسى	سوم	_	مفاهیم اولیه فناوری نانو و کاربردهای آن در شیمی	نانوالياف
نانولولەھاي كربني	چهارم	_	مفاهیم اولیه فناوری نانو و کاربردهای آن در شیمی	نانولوله كربنى
لایەھای نازک	پنجم	-	مفاهیم اولیه فناوری نانو و کاربردهای آن در شیمی	لایههای ناز ک
گرافن	چهارم	-	مفاهیم اولیه فناوری نانو و کاربردهای آن در شیمی	گرافن
نانوكاتاليستها	پنجم	_	مفاهیم اولیه فناوری نانو و کاربردهای آن در شیمی	كاتاليست
انرژی سطحی	اول	-	مفاهیم اولیه فناوری نانو و کاربردهای آن در شیمی	اثر افزایش سطح بر روی خواص شیمیایی و مفهوم انرژی سطحی
-	پنجم (رشتهٔ ریاضی و فیزیک) و چهارم (رشتهٔ علوم تجربی)	دوازدهم	فیزیک دبیرستان	فرآیند جذب انرژی از فوتونها توسط الکترونهای یک اتم
-	سوم (هر دو رشتهٔ ریاضی و فیزیک و علوم تجربی)	دوازدهم	فیزیک دبیرستان	امواج الكترومغناطيسي
_	سوم (رشتهٔ ریاضی و فیزیک)	دوازدهم	فیزیک دبیرستان	تداخل امواج

فماين

مفاهيم اوليه فناوري نانو و كاربردهاي آن در فيزيک

نمايه:

-	سوم	يازدهم	فیزیک دبیرستان	ایجاد میدان مغناطیسی در اثر عبور جریان الکتریکی از یک سیم
ليتوگرافي	سوم	-	مفاهیم اولیه فناوری نانو و کاربردهای آن در شیمی	ساخت تجهیزات و ادوات الکترونیک
نانولولەھاي كربني	چهارم	-	مفاهیم اولیه فناوری نانو و کاربردهای آن در شیمی	خواص نانولولەھاى كربنى
-	سوم	دهم	فیزیک دبیرستان	فشار مطلق
_	سوم	يازدهم	فیزیک دبیرستان	برهمکنش ذرهٔ باردار الکتریکی در حال حرکت با میدان مغناطیسی
-	اول	دهم	فيزيک دبيرستان	مدلسازى
-	پنجم (رشتهٔ ریاضی و فیزیک)	دوازدهم	فیزیک دبیرستان	مدل اتمی تامسون و رادرفورد
-	ششم و هفتم اول	يازدهم دوازدهم	زیست شناسی دبیرستان	ساختار کروموزوم، DNA و بازهای آلی