

به نام خدا

شبیه‌سازی‌های ساده در مقیاس نانو

نویسنده:
مهدی نیک‌عمل

از جناب آقای دکتر محمد ابراهیم فولادوند که ویراستاری علمی این
پدیده را به عهده گرفتند بسیار سپاسگذارم. این نوشته با پیگیری‌های
سرکار خانم فائقه اسلامی‌پور به مرحله چاپ رسیده که تشکر ویژه خود
را از ایشان به عمل می‌آورم.

"ستاد ویژه توسعه فناوری نانو" به منظور ارتقای آشنایی دانش‌آموزان با علوم و فناوری نانو و زمینه‌سازی تحقیق و پژوهش دانش‌آموزی در این حوزه، اقدام به تاسیس "باشگاه نانو" نموده است. این مجموعه سعی دارد تا دانش‌آموزان را در طی یک فرآیند آموزشی، از یادگیری مفاهیم اولیه تا خلق ایده‌های دانشم‌محور هدایت نماید. با این هدف که پس از فارغ‌التحصیلی، آموخته‌ها و تجربیات باشگاه پایه پژوهش‌های دانشگاهی گردد. از مهمترین اصول مطرح در باشگاه نانو، فراهم سازی امکان تجربه کارگروهی است. ماهیت بین‌رشته‌ای علوم و فناوری نانو، مفهومی است که در فرآیند فعالیت در باشگاه برای دانش‌آموزان ترسیم می‌شود. فراغت مقطعی از نظام اصولی آموزشی، خلق فرصت فعالیت‌های علمی-تفریحی و تجربه پژوهش‌های واقعی در مرز دانش، دورنمایی است که از راه‌اندازی باشگاه به تصویر کشیده شده است.

یکی از اولین گام‌های حرکت به سوی اهداف و چشم‌انداز باشگاه نانو، تامین منابع مطالعاتی و محتوای آموزشی فارسی برای دانش‌آموزان است. این منابع باید به‌نحوی تدوین شوند که با نظام آموزشی کشور همخوانی داشته باشند. به بیانی دیگر لازم است که با لحاظ کردن سیر آموخته‌های دانش‌آموزان ایرانی در نظام آموزشی کشور، روایتی ایرانی از فناوری نانو در اختیار آنها قرار گیرد. بررسی کتاب‌ها و انتشاراتی که با موضوع علوم و فناوری نانو تهیه شده‌اند و در بازار نشر کشور موجودند، حاکی از آن است که محتوای فارسی فعلی متناسب با نیاز متخصصین، پژوهشگران و دانشجویان علاقمند تهیه شده است و دانش‌آموزان (و البته هر نوآموز دیگری در این حوزه) به‌طور معمول مطالب مناسب خود را نخواهند یافت. برای رفع این مشکل تأمین محتوای مطالعاتی و آموزشی برای نوآموزان، ویژه دانش‌آموزان مقاطع مختلف تحصیلی، از اولویت‌های برنامه‌های باشگاه نانو در سال ۸۸ قرار گرفته است. در این راستا باشگاه از نوشته‌های نویسندگانی که به زبان ساده و گویا جنبه‌های مختلف علوم و فناوری نانو را مورد بررسی قرار می‌دهند، حمایت می‌کند.

«شبهه‌سازی‌های مقیاس نانو»، دومین کتاب آموزشی از مجموعه کتاب‌های "نانواز نو" است که به رویکردهای محاسباتی در علوم و فناوری نانو می‌پردازد. اهمیت روش‌های محاسباتی، پتانسیل بالای داخلی در توسعه این روش‌ها، اقبال نسل دانش‌آموزی امروز به استفاده از رایانه و عدم وجود منبع موثقی که این موضوع را به بیانی ساده شرح دهد، از جمله انگیزه‌های مهم انتشار این کتاب به‌شمار می‌آید.

نگارش این کتاب به قلم استاد گرانقدر آقای دکتر مهدی نیک عمل، با سابقه‌ای درخشان در تدریس و پژوهش در علوم محاسباتی نانومقیاس، باشگاه را امیدوار می‌کند تا این محتوا از جانب دانش‌آموزان علاقمند و دانشجویانی که قصد دارند به این حوزه از علم و فناوری وارد شوند، مورد توجه قرار گیرد.

در پایان خاطر نشان می‌شود که با توجه به گستردگی شاخه‌ها و زمینه‌های فناوری

نانو و عدم محدودیت آن به موضوعاتی که در این کتاب مطرح شده، باشگاه نانو تصمیم دارد با ادامه سری کتاب‌های "نانو از نو" به بازنویسی دستیافته‌های بنیادین فناوری نانو در زمینه‌هایی دیگر و به زبانی ساده بپردازد. امید است این سیاست‌ها و برنامه‌ها در تأمین رضایت پژوهشگران آینده و علاقمندان امروز مفید واقع شود. از خداوند سربلندی و پیشگامی علمی و عملی ایران اسلامی را خواستاریم.

اسلامی‌پور - موید

باشگاه دانش‌آموزی نانو

محتواسازی و آموزش فناوری‌های نوین در مقاطع آموزش عمومی، به دلایل گوناگون در شوراهای علمی و سیاست‌گذاری‌های برنامه‌های درسی کشور مطرح است. مشکلاتی چون آشنا نبودن آموزگاران با فناوری‌های نوین، نبود زمان کافی برای تدریس، گنجاندن دروس مجزا برای فناوری‌های نوین در آموزش عمومی و نیاز به امکانات مالی برای خرید دستگاه‌ها، ابزارها، وسایل و تجهیزات کارگاهی، بیشتر کشورها را به ادغام آموزش فناوری‌های نوین در سایر موضوعات درسی (که عمدتاً علوم است) در مقاطع آموزش عمومی، رهنمون ساخته‌است. برای آموزش جنبه‌های مختلف علوم نانو در کشور ما، معمولاً آموزگاران علوم نانو از تجارب شخصی خود به صورت ارائه درس‌هایی در قالب مقولات ویژه استفاده می‌کنند. در سطح آموزش عمومی و سطوح پیش از دانشگاه بیشتر از دوره‌های آموزشی کوتاه مدت و فوق برنامه برای گروه‌های مختلف علاقمند و مستعد دانش‌آموزی و معلمی استفاده می‌شود. فناوری نانو رویکردی کاملاً میان رشته‌ای دارد و برای آموزش آن باید از شیوه‌های آموزش چند رشته‌ای استفاده نمود. در واقع، مدرس فناوری نانو بهتر است دانشی از شاخه‌های مختلف علوم از جمله زیست‌شناسی، فیزیک، شیمی و ریاضیات داشته باشد.

بسیاری از نوشته‌ها، جزوه‌ها و کتاب‌های موجود در آموزش عمومی فناوری نانو در کشورمان بیشتر دنباله‌رو و برگردان مطالب مندرج در کتاب‌ها و مقالات سطوح دانشگاهی است. نوشتن جزوه‌ای منسجم در سطح دانش‌آموزی و مناسب سال‌های آغازین دانشگاهی کار چندان ساده‌ای نیست.

در این مجموعه با کمک تجاربی که از آموزش در سطوح دانش‌آموزی، دانشجویی و آموزگاری داشته‌ام تلاش می‌کنم مطالبی ساده و در عین حال با رویکردی پژوهشی ارائه نمایم. هدف اصلی ما آن است که پیوندی کاربردی میان دانش قبلی دانش‌آموزان و معلمان علوم (فیزیک و شیمی) با مفاهیم مدل‌سازی و شبیه‌سازی کامپیوتری فناوری نانو ایجاد کنیم و خوانندگان بتوانند ضمن درک کاربردهای دانش پیشینشان در فناوری نانو پای به عرصه‌های پژوهشی مقدماتی در شبیه‌سازی نانوساختارها، از جمله مدل‌سازی‌های چند مقیاسی بگذارند.

در علوم و فناوری نانو، در بسیاری از موارد، مدل‌سازی نقشی محوری دارد، به ویژه طراحی دستگاه‌های نانومتری دارای ساختارهای اتمی مولکولی به کمک مدل‌سازی‌ها و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، آفاق جدیدی را فرا روی فناوری نانو باز می‌کند.

امروزه با توجه به در دسترس بودن امکانات لازم برای شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، در بسیاری از مراکز دانشگاهی کشورمان، پژوهشگران به پژوهش‌های نظری - محاسباتی در حوزه‌های مختلف فناوری نانو، مشغول هستند. علوم کامپیوتر، نه تنها در شبیه‌سازی‌های فناوری نانو بلکه در جای جای فناوری‌های گوناگون دیگر نیز جایگاه ممتازی پیدا نموده‌است. فراگیر شدن استفاده از کامپیوتر در آموزش عمومی، نیاز به نوشتن کتابی

هرچند مقدماتی را دو چندان می‌کند.

در فصل نخست این کتاب مروری کلی، بر فناوری نانو و چهار نمونه از نانو ساختارهای کربنی خواهیم داشت. در فصل دوم، اهمیت محاسبات در علوم نانو را با مثال‌ها و تمرین‌های ساده نشان می‌دهیم. در فصل سوم، به برنامه‌سازی‌های کامپیوتری و کدنویسی در محیط ویژوال بیسیک ۶/ خواهیم پرداخت. در فصل چهارم و پنجم، در لابه‌لای دو مثال برای شبیه‌سازی، مفهوم حل عددی معادلات دیفرانسیلی که در محاسبات فناوری نانو ظاهر می‌شود را مرور می‌کنیم. در میان دو فصل سوم و چهارم خواننده با ساده‌ترین الگوریتم‌ها و معنای پیشروی گام به گام آشنا می‌شود. در فصل ششم و هفتم، با شبیه‌سازی دینامیک مولکولی آشنا می‌شویم و یک ظرف نانومتری دربردارنده گاز بی‌اثر را شبیه‌سازی می‌کنیم. در فصل هشتم، با روش‌های کاتوره‌ای و تصادفی در شبیه‌سازی‌ها آشنا شده و می‌آموزیم چگونه با داشتن یک سری عدد کاتوره‌ای می‌توانیم مسائلی از فناوری نانو که منجر به انتگرال‌های با توابع چندین متغیره می‌شود را به‌صورت عددی حل کنیم. در فصل پایانی هم به محاسبات ریز اتمی که مفهومی از اصطکاک در مقیاس نانو است، اشاره می‌کنیم. اعتقاد نویسنده بر آن است که دانش‌آموزان، دانشجویان و آموزگاران علاقمند تنها با دانش دبیرستانی از فیزیک و ریاضی خواهند توانست تمرین‌های این کتاب را به راحتی حل نمایند.

مهدی نیک عمل

تابستان ۱۳۸۸

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

■ فصل اول ■ فناوری نانو

- ۱ - ۱ - تاریخچه فناوری نانو
- ۱ - ۲ - تصویری از نانومتر
- ۱ - ۳ - اهمیت مقیاس نانو
- ۱ - ۴ - تعریف فناوری نانو
- ۱ - ۵ - روشهای ساخت در مقیاس نانو
- ۱ - ۵ - ۱ - روش ساخت پایین به بالا:
- ۱ - ۵ - ۲ - روش ساخت بالا به پایین:
- ۱ - ۶ - مثالهایی از نانوساختارها

■ فصل دوم ■ محاسبات عددی در علوم و مدلسازی در فناوری نانو

- ۲ - ۱ - نیاز به محاسبه عددی در علوم نانو
- ۲ - ۲ - مدلسازی و شبیهسازی
- ۲ - ۳ - شبیهسازی در علوم نانو
- ۲ - ۴ - اهداف شبیهسازی

■ فصل سوم ■ برنامه‌سازی کامپیوتری

- ۳ - ۱ - مقدمه
- ۳ - ۲ - الگوریتم
- ۳ - ۳ - فلوچارت
- ۳ - ۴ - آشنایی با برنامه‌نویسی در محیط ویژوال بیسیک ۶/۰ (VB)
- ۳ - ۴ - ۱ - مبانی کدنویسی به زبان بیسیک
- ۳ - ۵ - توابع پیغام در ویژوال بیسیک [۶]

■ فصل چهارم ■ شبیه‌سازی سقوط در میدان گرانش

- ۴ - ۱ - مقدمه
- ۴ - ۲ - تقریب عددی مشتق برای شبیه‌سازی سقوط و تعریف گام زمانی
- ۴ - ۳ - شبیه‌سازی سقوط در شارها
- ۴ - ۴ - شرایط مرزی آینده‌ای در شبیه‌سازیها

■ فصل پنجم ■ شبیه‌سازی نوسانگر هماهنگ

- ۵ - ۱ - مقدمه
- ۵ - ۲ - شبیه‌سازی نوسانگر هماهنگ ساده

- ۵ - ۳ - شبیه‌سازی نوسانگر هماهنگ میرا
- ۵ - ۴ - الگوریتم اویلر-کرومر و الگوریتم ورله سرعتی

■ فصل ششم ■ پتانسیل‌های میان اتمی در مدل‌سازی‌های فناوری نانو

- ۶ - ۱ - مقدمه
- ۶ - ۲ - مروری بر چند مفهوم
- ۶ - ۳ - انواع پیوندها
- ۶ - ۴ - برخی نیروهای ساده
- ۶ - ۱۵ - رابطه نیرو و پتانسیل

■ فصل هفتم ■ آشنایی با شبیه‌سازی دینامیک مولکولی

- ۷ - ۱ - مقدمه
- ۷ - ۲ - مدل نیروی واندروالسی در گاز بی اثر

■ فصل هشتم ■ کد شبیه‌سازی دینامیک مولکولی گاز بی اثر در جعبه نانومتری

- ۸ - ۱ - مقدمه
- ۸ - ۲ - الگوریتم
- ۸ - ۳ - فلوچارت کلی شبیه‌سازی
- ۷ - ۴ - کد شبیه‌سازی

■ فصل نهم ■ آشنایی با شبیه‌سازی‌های مونت کارلو

- ۹ - ۱ - مقدمه
- ۹ - ۲ - انتگرالگیری عددی
- ۹ - ۳ - انتگرالگیری مونت کارلوی ساده یا روش برخورد و خطا

■ فصل دهم ■ مدل‌سازی اصطکاک در مقیاس نانو

- ۱۰ - ۱ - مقدمه
- ۱۰ - ۲ - میکروسکوپ نیروی اتمی
- ۱۰ - ۳ - شبیه‌سازی اصطکاک در مقیاس نانو
- ۱۰ - ۴ - شبیه‌سازی اصطکاک در حضور مواد آلاینده سطح

فصل اول

فناوری نانو

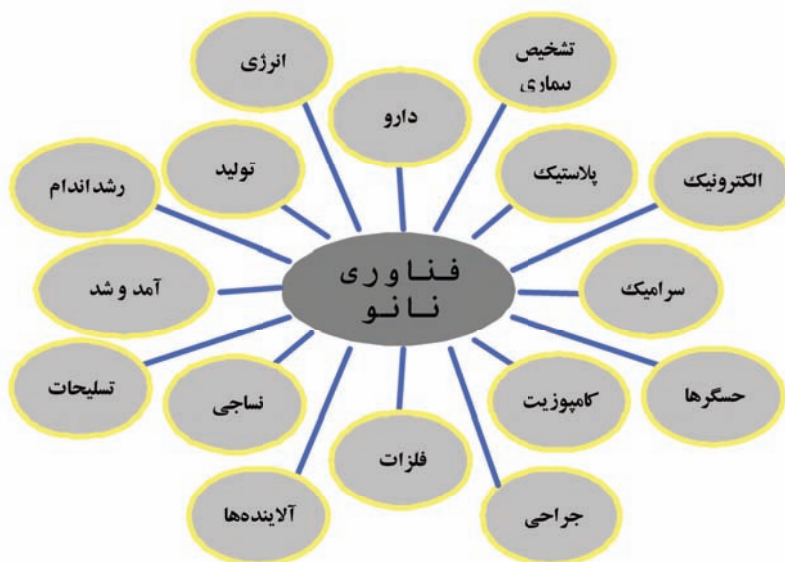
قوانین و اصول پایه‌ای فیزیک مخالفتی با ساخت اشیاء به صورت اتم به اتم ندارند یعنی تخلفی از قوانین صورت نمی‌گیرد. در اصل (به صورت نظری) چنین چیزی، انجام‌پذیر است ولی در عمل انجام شدنی نیست چون ما (در دنیای) خیلی بزرگ‌تری هستیم. ریچارد فاینمن (۱۹۵۹)

۱-۱ تاریخچه فناوری نانو

به باور بسیاری، سده بیست و یکم، آستانه یک انقلاب صنعتی ناشی از فناوری نانو است. جدول ۱-۱ فهرستی از انقلاب‌های صنعتی تاریخ بشری را نشان می‌دهد. کاربردهای متنوع این فناوری در عرصه‌های گوناگون، الکترونیک، اطلاعات، زیست فناوری، هوافضا، محیط زیست، کشاورزی و پزشکی، جهان را تحت تأثیر قرار داده است (نمودار ۱-۱). رویارویی کشورهای پیشرو در علوم و فناوری نانو، عمدتاً با هدف پیشسازی در عصر جهانی برای منافع اقتصادی بزرگ است. بخش چشمگیری از فعالیتهای پژوهشی در علوم و مهندسی سده کنونی به طور عمده‌ای، متوجه فناوری نانو شده‌است. در بیشتر کشورهای صنعتی پژوهش‌های مختلفی توسط دولت و بخش خصوصی به منظور افزایش پیشرفت در فناوری نانو در حال انجام است و میلیاردها دلار سرمایه‌گذاری هدفمند در این حوزه صورت می‌گیرد.

علوم نانو تاریخچه‌ای طولانی دارد و از سالیان پیش شیمیدانان از روش‌های علوم نانو در فعالیتهای خود استفاده می‌کنند که بی‌شبهت به روش‌های امروزی فناوری نانو نیست. اتم‌ها به عنوان واحدهای سازنده مواد پایه‌ای‌ترین تعریف در مقیاس نانو است. دموکریتوس، فیلسوف یونان باستان، واژه اتم را به کار برد و عقیده داشت «همه مواد از ذره‌های کوچک و تجزیه ناپذیری به نام اتم ساخته شده‌اند». در سال ۱۸۰۳، جان دالتون شیمی‌دان انگلیسی با آزمایش‌هایی، نظریه اتمی را بر اساس چند اصل بیان کرد، او نیز مانند یونانی‌ها کوچک‌ترین ذره ماده را اتم به معنی تجزیه یا تقسیم‌ناپذیر می‌دانست. نقطه آغاز و گسترش اولیه فناوری نانو به طور دقیق مشخص نیست. جام مشهور لیکرگوس در روم باستان (سده چهارم پس از میلاد)، یکی دیگر از نمونه‌هایی است که در ساخت آن از نانوذرات فلزی استفاده شده‌است. این جام، بسته به جهت نور تابیده، رنگ‌های متفاوتی از خود نشان می‌داد. در بررسی‌های انجام شده روی این جام، مشخص شده‌است که وجود مقادیر بسیار اندکی از نانوبلورهای فلز طلا و نقره، باعث رنگ ویژه جام لیکرگوس گردیده است.

نمودار ۱-۱ تاثیر علوم و فناوری نانو را در تمام حوزه‌های دانش بشری نشان می‌دهد



جدول ۱-۱ انقلاب‌های صنعتی تاریخی بشر

تاریخ آغاز	عصر	ویژگی
~ دو میلیون سال پیش	سنگ	ابزارسازی
~ ۵۵۰۰ سال پیش	برنز	آلیاژسازی
۱۷۶۴	صنعتی	ماشین بخار
۱۹۰۶	مصروف‌کنندگی	تولید انبوه
۱۹۴۶	اطلاعات	محاسبه‌تند
۱۹۵۳	ژنتیک	وراثت
۱۹۹۱	نانو	آرایش اتم‌ها

در سال ۱۹۵۹ ریچارد فاینمن فیزیک‌دان برجسته آمریکایی در میهمانی شامی که به میزبانی انجمن فیزیک آمریکا برگزار شده بود، سخنرانی کرد و ایده فناوری نانو را پیش روی همگان نهاد. عنوان سخنرانی وی "فضای زیادی در دنیای پایین وجود دارد" بود. فاینمن در سخنرانی معروفش ادعا کرد که تمام دایره‌المعارف بریتانیکا^۱ را می‌توان بر نوک سنجاق نگارش کرد. یعنی اندازه آن ۲۵۰۰ برابر کوچک می‌شود.

بعدها در سال ۱۹۷۴، نوریو تاینگوشی، آموزگار علوم در دانشگاه توکیو، نخستین بار واژه «فناوری نانو» را به کار گرفت. او در نوشته‌ای با نام «مفهوم اساسی فناوری نانو» اشاره

۱. این دایره‌المعارف ۳۲ جلدی، یکی از قدیمی‌ترین و معتبرترین منابع انگلیسی به شمار می‌آید.

می‌کند که فناوری نانو اساساً مجموعه‌ای از فرآیندهای جداسازی، ادغام و تشکیل مواد در حد یک اتم یا یک مولکول است. بعدها، این تعریف به طور گسترده‌تر توسط اریک درکسلر^۲ مورد بررسی قرار گرفت. در کسلر اولین دانش‌آموخته دکتری در سال ۱۹۹۱ از دانشگاه ام‌ای تی آمریکا در رشته فناوری نانو است. برای پایان دادن به بخش مقدمه شناخت فناوری نانو، در جدول ۱-۲- رخدادهای برجسته تاریخ فناوری نانو را سده بیستم و یکم آورده‌ایم.

جدول ۱-۲- وقایع برجسته در تاریخ فناوری نانو

سال	رخداد
۱۹۵۹	سخنرانی مشهور ریچارد فایمن با عنوان «در آن پایین‌ها فضای بسیاری وجود دارد»
۱۹۸۱	مقاله درکسلر در مهندسی مولکولی: روش‌های فراهم نمودن امکانات همگانی برای دستکاری‌های در ابعاد مولکولی، که در مجله آکادمی ملی علوم آمریکا منتشر شده‌است. اولین بار در مقاله‌ای در مجله فناوری نانو مولکولی به بحث گذاشته شد.
۱۹۸۲	پیدایش میکروسکوپ تونلی پیمایشی (روبشی)
۵۸۹۱	کشف «فولرین‌ها»، ساختارهای کربنی صفر بعدی
۱۹۸۶	اختراع میکروسکوپ نیروی اتمی
۱۹۹۱	کشف نانولوله‌های کربنی
۲۰۰۴	کشف صفحه تقریباً دو بعدی از اتم‌های کربن به نام گرافین در دانشگاه منچستر

۲-۱ تصویر از نانومتر

نانو یکی از پیشوندهای کمیت، به معنی یک میلیاردم یکای آن کمیت است. مثلاً یک نانومتر برابر یک میلیاردم متر است. برای پی بردن به کوچکی این مقیاس، موی سر انسان را در نظر بگیرید، با توجه به اینکه قطر موی انسان حدود $0/1$ میلی‌متر است. یک نانومتر صد هزار برابر کوچک‌تر از آن است یعنی یک میلیاردم متر است.

۳-۱ اهمیت مقیاس نانو

چون تمام مواد از اتم‌ها و مولکول‌ها ساخته شده‌اند و اتم‌ها و مولکول‌ها ابعادی در حدود نانومتر دارند؛ می‌توان به اهمیت ابعاد نانو پی برد. ویژگی موجی الکترون‌های درون ماده و اثر متقابل اتم‌ها با یکدیگر از جابجایی مواد در مقیاس نانومتر اثر می‌پذیرند. با تولید ساختارهایی در مقیاس نانومتر، امکان کنترل ویژگی‌های ذاتی آنها از جمله دمای ذوب، ویژگی‌های مغناطیسی و حتی رنگ مواد بدون تغییر در ترکیب شیمیایی بوجود می‌آید. اهمیت اساسی برای بشر کنونی آنست که اگر بتوانیم نوع چینش اتم‌های تشکیل دهنده

مواد را تغییر دهیم، می‌توانیم مواد جدیدی با ویژگی‌های از پیش خواسته شده تولید کنیم. این کار مهمترین هدف در فناوری نانو است. استفاده از این توانایی به محصولات و فناوری‌های جدید با کارایی بالا می‌انجامد که پیش از این میسر نبود. با کمک فناوری نانو می‌توانیم مواد و یاخته‌ها را دست‌کاری نماییم.

۱-۴ تعریف فناوری نانو

فناوری نانو، تولید کارآمد مواد و دستگاه‌ها به همراه کنترل ماده در مقیاس طولی نانومتر، و بهره‌برداری از خواص و پدیده‌های نوظهوری است که در مقیاس نانو گسترش یافته‌اند و این امکان‌پذیر نیست مگر با تعامل بیش از پیش تمام شاخه‌های دانش بشری. تفاوت اصلی فناوری نانو با دیگر فناوری‌ها، در مقیاس مواد و ساختارهایی است که در این فناوری بکار می‌روند. بلوک‌های سازنده پایه‌ای در مواد در مقیاس نانو هستند که ویژگی‌های آنها در مقیاس نانو با ویژگی‌هایشان در مقیاس‌های بزرگ‌تر فرق می‌کند. مواد نانومقیاس، به موادی گفته می‌شود که یکی از ابعاد آنها از ۱۰۰ نانومتر کوچک‌تر باشد. افزایش نسبت سطح به حجم مواد و تأثیرات چیره کوانتومی، دو ویژگی نمایان نانومواد هستند. این دو عامل اساسی بر بسیاری از ویژگی‌های ماکروسکوپی اندازه‌پذیر تأثیر نمایانی می‌گذارد. پیدایش خواص ویژه‌ای مانند تأثیر در واکنش‌ها، مقاومت مکانیکی و مشخصه‌های ویژه الکتریکی در مواد مبتنی بر فناوری نانو، از جمله این تغییر در خصوصیات است.

۱-۵ روش‌های ساخت در مقیاس نانو

طبیعت فناوری نانو، کار با ابعاد بسیار ریز است. ابعادی که ذرات در آنها قابل رویت نیستند. در دنیای نانو، برای اینکه در مولکول‌ها و اتم‌ها تغییراتی ایجاد کنیم و از آنها در ساخت اشیاء بزرگ‌تر بهره بگیریم از راهکارهای موجود در دنیای ماکروسکوپیک دنباله‌روی می‌کنیم. برای ساخت اشیاء در مقیاس نانو از روش‌هایی با ایده ساده، ولی در عمل مشکل بهره می‌برند:

۱-۵-۱ روش ساخت پایین به بالا:

در این روش، مواد از مولکول بر اساس اصول بنیادین علوم ساخته می‌شوند. به بیان دیگر، مولکول‌ها (و بلوک‌های اصلی) به صورت تک تک کنار هم‌دیگر چیده می‌شوند تا اینکه ساختار بزرگ‌تری پدید آید. برای تصویری از این روش، می‌توان ماشین اسباب‌بازی که از شماری لوگوی بازی کودکان به وجود می‌آید، را یک ساختار و هر تکه لوگو را یک عنصر پایه برای ساخت آن در نظر گرفت. گفتنی است که طبیعت هزاران سال است این روش را در ساخت نانوساختارهای طبیعی بکار برده است.

۱-۵-۲ روش ساخت بالا به پایین:

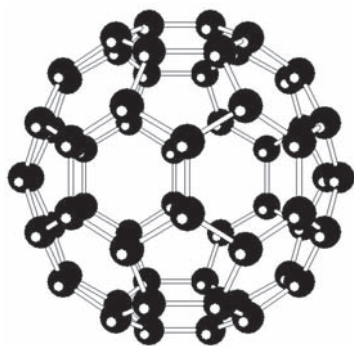
در این روش، نانوساختارها، بدون کنترل اتمی ساخته می‌شوند، به این ترتیب که

ساختاری در ابعاد بالا را اندک‌اندک به کمک ابزارهای ویژه مانند میکروسکوپ‌های در اختیار فناوری نانو به ابعاد نانومتری می‌رسانند.

۶-۱-۶ مثال‌هایی از نانو ساختارها

۱-۶-۱ ساختارهای صفر بعدی، باکی‌بال‌ها هستند که معروف‌ترین آنها کربن C_{60} است. مولکول C_{60} شامل ۶۰ اتم کربن و این اتم‌ها مانند یک توپ فوتبال که از ۱۲ پنج ضلعی و ۲۰ شش ضلعی تشکیل شده در کنار هم قرار گرفته‌اند. این ساختار توپ فوتبالی [۱] در شکل ۱-۱ نمایش داده شده‌است. این ساختارها در هر سه بعد، نانویی بوده و مولکول C_{60} دارای قطری در مرتبه 0.7 نانومتر است.

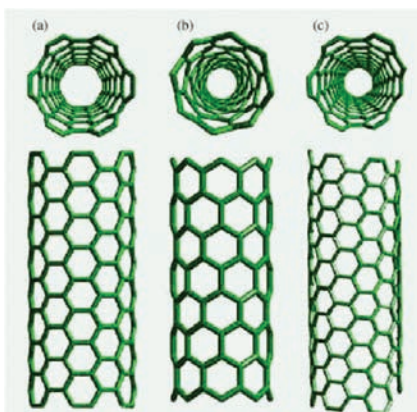
شکل ۱-۱ - نمایشی از یک مولکول C_{60} .



۱-۶-۲ ساختارهای یک بعدی؛ نانولوله‌های کربنی که در دو راستا، دارای قطر نانومتری بوده و در راستای محور لوله، میکرونی هستند [۲].

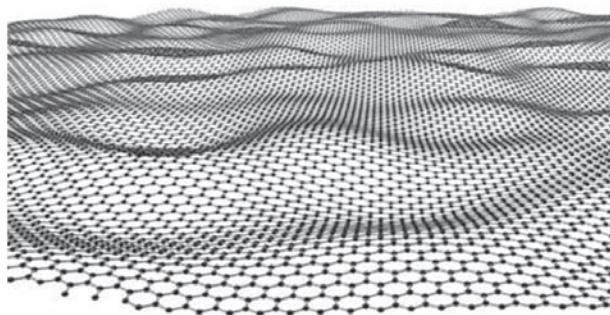
شکل ۱-۶ یک نمونه از آنها را نشان می‌دهد. اتم‌های کربن روی بدنه نانولوله‌ها همگی دارای ساختار شش ضلعی داشته و بسته به آنکه ورقه مسطح شش ضلعی را چگونه بتابانیم سه گونه مختلف از این ساختارها به وجود می‌آید. خصوصیات الکترونی و مکانیکی این لوله‌های کربنی باعث گردیده آنها به عنوان زیربنای تولیدات فناوری نانو در دو دهه گذشته عنوان شوند.

شکل ۱-۲ - نمایشی از سه نوع مختلف نانولوله‌های کربنی



۳-۶-۱ ساختارهای دو بعدی گرافین که در یک راستا نانومقیاس بوده و دارای ضخامت از مرتبه آنگستروم هستند. این ساختار جدید از کربن در سال ۲۰۰۴ در دانشگاه منچستر کشف گردید [۳] و چیزی نیست مگر یک صفحه تقریباً تخت از شش ضلعی‌هایی از اتم‌های کربن.

شکل ۱-۳- نمای از صفحه موج گرافین.



۴-۶-۱ ساختارهای سه بعدی گرافیت که سالیان بسیار زیادی است بشر آن را می‌شناسد. نوک مدادهای زغالی از جنس گرافیت هستند که ساختار سه بعدی ساخته شده از ورقه‌هایی از شبکه‌های شش ضلعی دارد. شکل زیر، ساختار هندسی گرافیت را نشان می‌دهد. فاصله میان دو ورقه در حدود ۳/۳۵ آنگستروم است و شش ضلعی‌هایی از جنس کربن سازنده هر صفحه هستند.

هر چند حدود ۳۰ سال پیش، تنها ساختار گرافیت از کربن شناخته شده بود، ولی در این چند سال گذشته با کمک فناوری نانو مشخص شد که عنصر کربن تا کنون تنها عنصری در طبیعت است که ساختار پایدار در هر سه بعد را به وجود آورده است. به همین دلیل کربن را به عنوان یک عنصر کلیدی در گسترش فناوری نانو می‌شناسند.

شکل ۱-۴- نمای از ساختار سه بعدی گرافیت

