بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده فنی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

تحلیل رفتار ارتعاشی نانو مخروط های کربنی بر مبنای مدل المان محدود سه بعدی

از:

زهرا فیروزنیا

استادان راهنما:

دکتر رضا انصاری خلخالی

دکتر علی باستی

اسفند ۱۳۹۲

این اثر ناچیز، تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم، گوهرهای گرانبهای زندگیم که در تمام لحظات زندگی با فداکاری و از خودگذشتگی، مرا الهام‌بخش و راهنما بوده‌اند.

با سپاس فراوان از اساتید بزرگوارم،

آقایان دکتر رضا انصاری و دکتر علی باستی

که با سعه‌ی صدر و صبوری مرا راهنمایی نموده و در پیشبرد این پایان‌نامه سعی تمام مبذول داشته‌اند.

چکیده

تحلیل رفتار ارتعاشی نانو مخروط های کربنی بر مبنای مدل المان محدود سه بعدی

زهرا فیروزنیا

در پایان‌نامه‌ی حاضر، رفتار ارتعاشی نانو مخروط‌های کربنی تک‌لایه، با استفاده از روش المان محدود بر پایه‌ی جرم و فنر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مدل المان محدود بکار رفته، اتم‌های کربن با استفاده از المان‌های جرم متمرکز مدلسازی شده و المان‌های فنر طولی و پیچشی برای شبیه‌سازی پیوند کوالانس میان اتم‌های کربن بکار می‌روند. المان‌های فنر طولی، برهم‌کنش میان هر دو اتم کربن موجود در یک پیوند و المان‌های فنر پیچشی، برهم کنش پیوندهای مجاور با هر اتم کربن را مدلسازی می‌کنند. نانو مخروط‌های کربنی با طول‌ها و زاویه‌ی رأس‌های مختلف، تحت شرایط مرزی متفاوت مدلسازی شده و رفتار ارتعاشی آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. فرکانس‌های طبیعی نانو مخروط‌های مختلف به صورت گرافیکی ارائه شده و تأثیر نوع شرط مرزی اعمال می‌شود و همچنین تغییر پارامترهای هندسی نانو مخروط بر مقدار فرکانس بدست آمده، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همانطور که انتظار می‌رود، تأثیر پارامترهای هندسی بگونه ای است که با افزایش سایز نانو مخروط مقدار فرکانس طبیعی آن کاهش می‌یابد. بدین صورت که با افزایش زاویه‌ی رأس نانو مخروط و همچنین افزایش طول آن، مقدار عددی فرکانس حاصل کاهش می‌یابد. نوع شرط مرزی اعمال شده به نانو مخروط نیز سبب تغییر مقدار فرکانس بدست آمده می‌شود. نتایج حاکی از این است که هرچقدر شرط مرزی اعمالی، اتم‌های کربن بیشتری را درگیر کند، مقدار فرکانس طبیعی حاصل افزایش می‌یابد.

کلید واژه: نانو مخروط کربنی، مدل جرم و فنر، روش المان محدود، فرکانس طبیعی.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
تقدیم	ب
تشکر	پ
فهرست مطالب	ت
فهرست شکل‌ها	ج
فهرست علائم اختصاری	خ
چکیده فارسی	ذ
چکیده انگلیسی	ر
فصل اول: پیشگفتار	
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۱-۱ تاریخچه‌ی نانوتکنولوژی	۲
۱-۱-۲ برخی ابزارهای مشاهده در مقیاس نانو	۵
۱-۱-۳ دسته بندی نانو مواد	۶
۱-۱-۴ روش‌های مطالعه و بررسی خواص مکانیکی ساختارهای نانو	۱۱
۱-۲ مروری بر پژوهش‌های پیشین	۱۳
۱-۳ اهداف رساله‌ی اخیر	۱۸
فصل دوم: ساختارهای کربن	
۲-۱ ساختار اتم کربن	۲۲
۲-۲ گونه‌های مختلف کربن	۲۳
۲-۳ نانو مخروط‌های کربنی	۲۷
۲-۳-۱ ساختار نانو مخروط‌های کربنی	۲۸
۲-۳-۲ خواص نانو مخروط‌های کربنی	۲۸
۲-۴ کاربرد نانو ساختارها	۲۹

۲-۴-۱ کاربرد نانو مخروط‌ها ۳۰

فصل سوم: هندسه صفحه گرافیتی و نانو مخروط‌های کربنی

۳-۱ مقدمه ۳۳

۳-۲ هندسه صفحه گرافیتی ۳۳

۳-۳ تشکیل نانو مخروط کربنی تک‌لایه از صفحه گرافیتی ۳۶

فصل چهارم: تعیین ثوابت نیرویی و مدلسازی المان محدود

۴-۱ معرفی انرژی‌های پتانسیل بین اتمی ۴۱

۴-۲ محاسبه ی ثوابت نیرویی ۴۲

۴-۳ مدلسازی المان محدود ۴۶

۴-۳-۱ تعیین ماتریس‌های سفتی ۴۶

۴-۳-۲ تعیین خواص مکانیکی ۵۰

۴-۳-۳ محاسبه‌ی فرکانس طبیعی ۵۲

فصل پنجم: بحث و نتایج

۵-۱ تحلیل رفتار مکانیکی نانو مخروط‌های کربنی تک‌لایه ۵۵

۵-۱-۱ مدول یانگ نانو مخروط‌های کربنی تک‌لایه ۵۵

۵-۱-۲ مدول برشی نانو مخروط‌های کربنی تک‌لایه ۵۶

۵-۲ تحلیل رفتار ارتعاشی نانو مخروط‌های کربنی تک‌لایه ۵۷

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه‌گیری ۷۲

۶-۲ ارائه پیشنهادات ۷۳

مراجع و مآخذ ۷۵

ضمائم ۸۱

فهرست شکل‌ها

فصل اول: پیشگفتار

شکل (۱-۱): جام لیکرگوس ۳

شکل (۱-۲): نمونه‌ای از نانوخوشه‌ها ۷

شکل (۱-۳): نمایی از نانوسیم ۸

شکل (۱-۴): تصاویر SEM نانو حفره‌ی دوبل طلا (الف) عکسبرداری شده بر روی سطح نرمال (ب) عکسبرداری شده تحت زاویه‌ی ۳۵° ۸

شکل (۱-۵): نانولوله‌ی کربنی تک‌لایه ۹

شکل (۱-۶): نانولوله‌ی کربنی چندلایه ۹

شکل (۱-۷): تصاویر TEM نانو مخروط‌های کربنی با زاویه رأس‌های مختلف (الـف) $۱۹/۲^{\circ}$، (ب) $۳۸/۹^{\circ}$، (ج) ۶۰° و (د) $۸۶/۶^{\circ}$ ۱۰

شکل (۱-۸): پنج پیکربندی امکان‌پذیر برای نانو مخروط ۱۱

شکل (۱-۹): نمونه‌ی نانو مخروط در کار کریشنان با زوایای رأس (الـف) $۱۹/۲^{\circ}$، (ب) $۳۸/۹^{\circ}$، (ج) ۶۰°، (د) $۸۶/۶^{\circ}$ و (ه) ۱۲۳.۶° . (ی) نمای نوک نانومخروط ۱۴

فصل دوم: ساختارهای کربن

شکل (۲-۱): گونه‌های مختلف اتم کربن الف) آمورف ب) فولرن ج) الماس د) گرافیت ۲۳

شکل (۲-۲): نمایی از ساختار کربن بی‌شکل ۲۴

شکل (۲-۳): ساختار مکعبی شکل الماس ۲۵

شکل (۲-۴): ساختار لایه لایه ای گرافیت ۲۵

شکل (۲-۵): ساختار فلورن الف) C_{60} ب) C_{540} ج) C_{70} ۲۶

شکل (۲-۶): شکل شماتیک نانو مخروط کربنی ۲۷

فصل سوم: هندسه صفحه گرافیتی و نانو مخروط‌های کربنی

شکل (۳-۱): نمایش صفحه گرافیتی دو بعدی ۳۳

شکل (۳-۲): سلول واحد صفحه گرافیتی ۳۴

شکل (۳-۳): نمایش دیگری از سلول واحد صفحه گرافیتی ۳۵

شکل (۳-۴): تبدیل قطاعی از ورق گرافن دایره‌ای به مخروط سه‌بعدی ۳۶

شکل (۳-۵): تبدیل یک ورق گرافن در سیستم مختصات قطبی به یک مخروط سه بعدی در سیستم مختصات کارتزین ۳۷

شکل (۳-۶): قطاع های برش خورده از ورق گرافن برای تبدیل به نانو مخروط ۳۸

شکل (۳-۷): نانو مخروط های کربنی با زوایای رأس °۱۹/۲، °۳۸/۹، °۶۰، °۸۶/۶ و °۱۱۲/۸ ۳۹

فصل چهارم: تعیین ثوابت نیرویی و مدلسازی المان محدود

شکل (۴-۱): پیوند های مختلف میان اتم های کربن. ۴۱

شکل (۴-۲): یک مدل شماتیک از ورق گرافن با یک اتم مشخص شده (الف) برای تعریف k_r (ب) برای تعریف k_θ ۴۳

شکل (۴-۳): الف) تغییرات زاویه‌ی درون صفحه ب) تغییرات زاویه‌ی خارج از صفحه ۴۵

شکل (۴-۴): چگونگی انتخاب گره‌ها و المان‌ها در مدلسازی المان محدود ۴۶

شکل (۴-۵): جابجایی اتم ها با تغییر زاویه ۴۸

شکل (۴-۶): جابجایی اتم‌ها با تغییرات زاویه‌ی خارج از صفحه ۴۹

شکل (۴-۷): نمایی از نانو مخروط تحت نیروی کششی و شرط مرزی (برای تعیین مدول یانگ) ۵۱

شکل (۴-۸): نمایی از نانو مخروط تحت گشتاور پیچشی و شرط مرزی (برای تعیین مدول برشی) ۵۲

شکل (۴-۹): الف) نمایی از نانو مخروط باز ب) اتم‌های مرزی نانومخروط ۵۳

فصل پنجم: بحث و نتایج

شکل (۵-۱): تغییرات مدول یانگ نانو مخروط‌های کربنی تک‌لایه با طول نانو مخروط ۵۶

شکل (۵-۲): تغییرات مدول برشی نانو مخروط‌های کربنی تک‌لایه با طول نانو مخروط ۵۷

شکل (۵-۳): تغییرات فرکانس طبیعی نانو مخروط کربنی با زاویه‌ی رأس °۱۹/۲ به ازای طول‌های مختلف از نانومخروط الف) تحت شرط مرزی یکسرگیردار ب) تحت شرط مرزی دوسر گیردار ۵۸

شکل (۵-۴): تغییرات فرکانس طبیعی نانو مخروط کربنی با زاویه‌ی رأس °۳۸/۹ به ازای طول‌های مختلف از نانو مخروط الف) تحت شرط مرزی یکسرگیردار ب) تحت شرط مرزی دوسر گیردار ۵۹

شکل (۵-۵): تغییرات فرکانس طبیعی نانو مخروط کربنی با زاویه‌ی رأس °۶۰ به ازای طول‌های مختلف از نانو مخروط الف) تحت شرط مرزی یکسرگیردار ب) تحت شرط مرزی دوسر گیردار ۶۰

شکل (۵-۶): تغییرات فرکانس طبیعی نانو مخروط کربنی با زاویه‌ی رأس °۸۶/۶ بـه ازای طـول‌هـای مختلـف از نـانو مخروط الف) تحت شرط مرزی یکسرگیردار ب) تحت شرط مرزی دوسر گیردار ۶۱

شکل (۵-۷): تغییرات فرکانس طبیعی نانو مخروط کربنی با زاویه‌ی رأس °۱۱۲/۸ به ازای طول‌هـای مختلـف از نـانو مخروط الف) تحت شرط مرزی یکسرگیردار ب) تحت شرط مرزی دوسر گیردار ۶۲

شکل (۵-۸): تغییرات فرکانس‌های طبیعی نانو مخروط‌های کربنی با زاویه رأس‌هـای مختلـف بـر حسـب طـول‌هـای مختلف از نانو مخروط الف) تحت شرط مرزی یکسرگیردار ب) تحت شرط مرزی دوسر گیردار ۶۳

شکل (۵-۹): تغییرات فرکانس‌های طبیعی نانو مخروط‌های کربنی با زاویه‌ی رأس‌های مختلف بر حسب مـود ارتعـاش الف) تحت شرط مرزی یکسرگیردار ب) تحت شرط مرزی دو سر گیردار ۶۴

شکل (۵-۱۰): تغییر فرکانس‌های طبیعی نانو مخروط کربنی با زاویه‌ی رأس‌های مختلف بر حسب طول نـانو مخـروط به ازای شرایط مرزی مختلف الف) ° ۱۱۲/۸ ب) °۸۶/۶ ج) °۶۰ د) °۳۸/۹ ه) °۱۹/۲ ۶۶

شکل (۵-۱۱): تغییر فرکانس‌های طبیعی نانو مخروط‌های کربنی با شعاع‌های کوچک مختلف بر حسـب طـول تحـت شرط مرزی یکسرگیردار الف) ° ۱۱۲/۸ ب) °۸۶/۶ ج) °۶۰ د) °۳۸/۹ ه) °۱۹/۲ ۶۸

شکل (۵-۱۲): تغییر فرکانس‌های طبیعی نانو مخروط‌های کربنی با شعاع‌های کوچک مختلف بر حسـب طـول تحـت شرط مرزی دوسرگیردار الف) ° ۱۱۲/۸ ب) °۸۶/۶ ج) °۶۰ د) °۳۸/۹ ه) °۱۹/۲ ۶۹

شکل (۵-۱۳): تغییر فرکانس طبیعی نانو مخروط‌های کربنی با زوایای رأس مختلف به ازای تغییرات نسبت طـول بـه شعاع کوچک نانو مخروط الف) نانو مخروط یکسرگیردار با شعاع کوچک ۴ آنگستروم ب) نانو مخروط یکسـرگیردار بـا شعاع کوچک ۳ آنگستروم ج) نانو مخروط دوسرگیردار با شعاع کوچک ۴ آنگستروم د) نـانو مخـروط دوسـرگیردار بـا شعاع کوچک ۳ آنگستروم ۷۰

شکل (الف-۱): المان خرپای سه‌بعدی در دستگاه‌های مختصات محلی و کلی ۸۲

فهرست علائم اختصاری

زاویه ی قطاع دایره‌ای جدا شده	d_θ
نیرو	F
گشتاور	T
ثابت شبکه	a_{c-c}
طول باند کربن-کربن	A
شعاع نانو مخروط	R
شعاع کف نانو مخروط	R
انرژی ناشی از کشش پیوند	E_r
انرژی ناشی از تغییر زاویه	E_θ
انرژی ناشی از پیچش زاویه ی دوسطحی	E_φ
انرژی ناشی از پیچش خارج از سطح	E_ω
انرژی ناشی از برهم‌کنش‌های واندروالس	E_{vdw}
تغییر طول پیوند	Δr
تغییر زاویه‌ی پیوند	$\Delta\theta$
تغییر زاویه‌ی خارج از صفحه	$\Delta\varphi$
ثابت نیرویی کشش پیوند	k_r
ثابت نیرویی تغییر زاویه‌ی پیوند	k_θ
ثابت نیرویی تغییر زاویه ی خارج از صفحه	k_β
جابجایی نانو مخروط	δ
سطح مقطع متغیر	$A(x)$
ممان اینرسی	I
ممان اینرسی قطبی	J
مدول یانگ	E
مدول برشی	G

ماتریس سفتی کل	K
ماتریس جرم کل	M
فرکانس طبیعی iام	ω_i
شکل مود متناظر با فرکانس طبیعی iام	q_i

فصل اول:

پیشگفتار

۱-۱ مقدمه

ایجاد مواد جدید با کارایی بالا به عنوان مثال سختی و خستگی بالا، یکی از نیازمندی‌های پیشرفت صنعتی می‌باشد. در سال‌های اخیر، با کشف ساختارهای جدید در مقیاس نانو (برابر با 10^{-9} متر) در سال ۱۹۹۱ که بعدها نانو لوله‌ی کربنی نامیده شد [۱]، تحول عظیمی در حوزه‌ی مواد و ساختارهای مهندسی رخ داد؛ بگونه‌ای که اغلب شاخه‌های مهندسی و علوم پایه از دیدگاه خود به مطالعه‌ی مواد جدید پرداختند. دنیای تکنولوژی ناگزیر از حرکت به سوی فناوری نانو می‌باشد. تأثیری که فناوری نانو در صنعت خواهد گذاشت بگونه‌ای است که فناوری نانو را انقلاب خُرد نام‌گذاری کرده‌اند. نانوتکنولوژی با ابزار، مواد و همچنین کاربردهای آنها در حوزه‌هایی مانند مهندسی مکانیک، مواد، الکترونیک، کامپیوتر، حسگرها، عملگرها و ماشین‌ها در مقیاس نانو سروکار دارد. در این فناوری اتم‌ها و مولکول‌ها به عنوان آجرهای ساختمانی مواد مهندسی به حساب می‌آیند. همچنین، می‌توان نانوتکنولوژی را بر اساس اجزاء تشکیل دهنده‌ی این نام‌گذاری، یعنی نانو و تکنولوژی تعریف کرد. تکنولوژی در کل به معنی ساخت ابزارهای کاربردی با استفاده از قوانین علمی می‌باشد و نانومتر به معنی یک میلیاردم متر می‌باشد که این مقدار تقریباً چهار برابر قطر یک اتم است. به طور خلاصه، نانوتکنولوژی شامل دستکاری مواد در حوزه‌ی اتم‌ها بوده که با قرار دادن اتم‌ها در جای خاص خود، اجازه می‌دهد تا موادی سبک‌تر، محکم‌تر، ارزان‌تر، تمیزتر و با دقت ابعادی بالاتر ساخته شوند [۲].

۱-۱-۱ تاریخچه‌ی نانوتکنولوژی

در طول تاریخ بشر از زمان یونان باستان، مردم و بخصوص دانشمندان بر این باور بودند که مواد را می‌توان آنقدر به اجزاء کوچک تقسیم کرد تا به ذراتی رسید که خرد ناشدنی هستند و این ذرات بنیان مواد را تشکیل می‌دهند. شاید بتوان دموکریتوس[1] فیلسوف یونانی را پدر فناوری و علوم نانو دانست؛ چرا که در حدود ۴۰۰ سال قبل از میلاد مسیح وی اولین کسی بود که واژه‌ی اتم را که به معنی تقسیم‌نشدنی در زبان یونانی است، برای توصیف ذرات سازنده‌ی مواد به کار برد. حدود ۲۰۰ سال بعد از دموکریتوس، کتابی منظوم تحت عنوان " در طبیعت اشیاء" توسط لوکریتوس[2] رومی نوشته شد و در آن کتاب اشاره شد که: "جهان ما روی یک فضای نامتناهی و ذراتی که خردتر نمی‌شوند، برپاست: اتم‌ها این ذرات نامتناهی ". در سال ۱۸۰۳ میلادی دالتون نظریه‌ی اتمی خود را مبنی بر تجزیه ناپذیر بودن اتم‌ها مطرح نمود، اما تلاش دانشمندانی چون تامسون، رادرفورد و دیگران اثبات کرد که خود اتم از ذرات کوچکتری مانند الکترون، پروتون و نوترون ساخته شده است. امروزه می دانیم که ذرات زیراتمی بسیاری وجود دارند.

[1] Democritus

[2] Lucretius

نقطه‌ی شروع و توسعه ی اولیه فناوری نانو به طور دقیق مشخص نیست. شاید بتوان گفت که اولین نانوتکنولوژیست‌ها شیشه‌گران قرون وسطایی بوده‌اند که از قالب‌های قدیمی برای شکل‌دادن شیشه‌هایشان استفاده می‌کرده‌اند. البته این شیشه‌گران نمی‌دانستند که چرا با اضافه‌کردن طلا به شیشه رنگ آن تغییر می‌کند. در آن زمان برای ساخت شیشه‌های کلیساهای قرون وسطایی از ذرات نانومتری طلا استفاده می‌شده است و با این کار شیشه‌های رنگی بسیار جذابی بدست می‌آمده است. این قبیل شیشه‌ها هم‌اکنون در بین شیشه‌های بسیار قدیمی یافت می‌شوند. رنگ به‌وجود آمده در این شیشه‌ها برپایه این حقیقت استوار است که مواد با ابعاد نانو دارای همان خواص مواد با ابعاد میکرو نمی‌باشند. جام معروف لیکرگوس[1] که در قرن چهارم میلادی ساخته شده است، یک مثال برای استفاده از فناوری نانو در زمان‌های گذشته می باشد. این جام که در ساخت آن از مقادیر بسیار کمی طلا (۴۰ ppm^2) و نقره (۳۰۰ ppm) استفاده شده است، دارای این ویژگی است که به هنگام قرارگرفتن این جام درمعرض نور غیرمستقیم رنگ جام سبز به نظر می‌رسد اما با تابیدن نور مستقیم به این جام رنگ آن قرمز و بدنه آن نیمه شفاف می‌شود. آنالیز این شیشه حکایت از وجود مقادیر بسیار اندکی از بلورهای فلزی ریز ۷۰۰ نانومتر دارد ، که حاوی نقره و طلا با نسبت مولی تقریبا ۱۴ به ۱ است؛ حضور این نانو بلورها باعث رنگ ویژه جام لیکرگوس گشته است [۲].

شکل (۱-۱): جام لیکرگوس [۳]

اولین جرقه‌ی فناوری نانو (البته در آن زمان هنوز به این نام شناخته نشده بود) در سال ۱۹۵۹ زده شد .در این سال ریچارد فاینمن[3] مقاله‌ای را درباره‌ی قابلیت‌های فناوری نانو در آینده، منتشر ساخت. با وجود موقعیت‌هایی که توسط بسیاری تا آن زمان کسب شده بود، فاینمن را به عنوان پایه‌گذار این علم می‌شناسند. فاینمن که بعدها جایزه‌ی نوبل را در فیزیک دریافت کرد، درآن سال طی یک سخنرانی با عنوان « فضای زیادی در سطوح پایین وجود دارد »، ایده‌ی فناوری نانو را برای عموم

[1] Lycurgus

[2] Parts Per Million

[3] Richard P. Feynman

مردم آشکار ساخت. سخنرانی او شامل این مطلب بود که می‌توان تمام دایره‌المعارف بریتانیکا را بر روی یک سنجاق نگارش کرد. یعنی ابعاد آن به اندازه‌ی ۱/۲۵۰۰۰ ابعاد واقعیش کوچک می شود. او همچنین از دوتایی‌کردن اتم‌ها برای کاهش ابعاد کامپیوترها سخن گفت. وی همچنین در آن سخنرانی توسعه بیشتر فناوری نانو را پیش‌بینی نمود [۲].

واژه فناوری نانو اولین بار توسط نوریوتاینگوچی[1] استاد دانشگاه علوم توکیو در سال ۱۹۷۴ بر زبان‌ها جاری شد. او این واژه را برای توصیف ساخت مواد و وسایل دقیقی که تلورانس ابعادی آنها در حد نانومتر می‌باشد، به کار برد. در سال ۱۹۸۶ این واژه توسط کی اریک درکسلر[2] در کتابی تحت عنوان : «موتور آفرینش: آغاز دوران فناوری‌نانو» بازآفرینی و تعریف مجدد شد. وی این واژه را به شکل عمیق‌تری در رساله‌ی دکترای خود مورد بررسی قرار داده و بعدها آنرا در کتابی تحت عنوان " نانوسیستم‌ها، ماشین‌های مولکولی، چگونگی ساخت و محاسبات آنها" توسعه داد.

از جمله کاربردهای نانوتکنولوژی در شاخه‌های مختلف علوم می‌توان به نانو بیوتکنولوژی (دارویی، کشاورزی، پزشکی و ...)، نانومواد (نانولوله‌ها، نانوپودرها، نانوکامپوزیت‌ها و ...)، نانوتکنولوژی در صنایع نفت و گاز و صنایع شیمیایی، نانوالکترونیک، نانومهندسی (ساخت در مقیاس نانو مانند تجهیزات پزشکی) و نانوتکنولوژی در صنایع نظامی اشاره کرد. کاربردهای گسترده‌ی فناوری نانو، اغلب کشورهای صنعتی را به سوی این فناوری سوق داده و گام‌های مناسبی در این راه برداشته شده است. این گام‌ها علاوه بر انجام تحقیقات در زمینه‌ی ساخت، در حوزه‌ی تحلیل‌های مهندسی رفتار مواد در مقیاس نانو نیز می‌باشد. ورود به حوزه‌ی فناوری نانو بدون شناخت رفتار مکانیکی مواد در این حوزه امکان پذیر نیست؛ از این رو بررسی و تحلیل رفتار مواد در مقیاس نانو مبحث مهمی است که از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد.

در یک چشم‌انداز، نانوتکنولوژی طیف وسیعی از مواد را در بر می‌گیرد که طبقه‌بندی آنها ضروری است. مهمترین این طبقه‌بندی‌ها خصوصیت و نوع مواد نانو ساختار است که شامل خصوصیات مختلف الکتریکی، مکانیکی، نوری، مغناطیسی، شیمیایی، کاتالیستی و بیولوژیکی است. اما در این مسیر مشکلاتی هم وجود دارد که یکی از آنها تغییر خواص فیزیکی به خاطر تغییر قوانین فیزیکی است؛ چراکه وقتی سیال یا ماده‌ی جامدی را در فضایی کمتر از ۱۰۰ نانومتر محدود می‌کنیم این محدودیت در رفتار آن تأثیر می‌گذارد و به تصویر کشیدن این محدودیت در روابط و معادلات دشوار است. مشکل دیگر اینکه در علوم مهندسی کلاسیک، مباحث را تفکیک و هریک را جداگانه بررسی می‌کنند. در حالیکه این جداسازی در مقیاس نانو مقدور نیست؛ زیرا غالباً خصوصیات مختلف بر هم تأثیر می‌گذارند و ضرورت ایجاد دانش‌های جدید احساس می‌شود. پس از

[1] Norio Taniguchi

[2] K. Eric Drexler

یافتن ارتباط میان خصوصیات مختلف، نیاز به یافتن روابط اساسی مهندسی کنونی داریم تا بتوان از این مواد استفاده‌ی عملی کرد.

۱-۱-۲ برخی ابزارهای مشاهده در مقیاس نانو

برای مشاهده و بررسی بهتر نانو ساختارها نیاز به ابزارهایی است که در ادامه برخی از آنها توضیح داده می‌شود.

- **میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM[1]**

با استفاده از ولتاژ ۱۰ تا ۲۰۰ هزار ولت و پرتاپ الکترون از آند به کاتد، وضوح تصویری خوبی برای اندازه‌های ۱۰۰ نانومتر ایجاد می‌کند.

- **میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM[2]**

در این وسایل، نمونه‌ی مورد نظر بایستی به اندازه‌ی کافی نازک باشد تا پرتو از آن عبور کند و اثراتی بر صفحه‌ی فلوئورسنت بر جای گذارد. وضوح تصاویر این میکروسکوپ تا ۵ نانومتر (حدود ۸۰ اتم کربن) را پوشش می‌دهد.

- **میکروسکوپ تونلی روبشی STM[3]**

اندازه‌ی نوک این نوع میکروسکوپ در حدود یک اتم است و در دو حالت کار می‌کند. در حالت اول که مود ارتفاع ثابت نام دارد، با نزدیک کردن صفحه به نوک میکروسکوپ و حرکت صفحه با توجه به تغییر جریان میان نوک و صفحه و تقویت آن، پستی و بلندی‌های سطح حس می‌شود. در حالت دوم که مود جریان ثابت نامیده می‌شود، با حرکت صفحه سعی خواهد شد که جریان ایجاد شده ثابت بماند. لذا نوک میکروسکوپ تغییر ارتفاع خواهد داد و این تغییرات فاصله به شکل کانتورهایی ترسیم خواهد شد.

- **میکروسکوپ نیروی اتمی AFM[4]**

این وسیله در دو حالت ارتفاع ثابت و نیرو ثابت، با تابش لیزر و استفاده از دیودهای نوری، عکس‌برداری انجام می‌دهد. اساس کار این میکروسکوپ با میکروسکوپ STM یکسان است. نوع کارکرد این میکروسکوپ طوری است که ارتعاشات، کمانش و

[1] Scanning electron microscope

[2] Transmission electron microscope

[3] Scanning tunneling microscope

[4] Atomic force microscope

تحلیل‌های استاتیکی در حسگر آن اهمیت یافته و نیاز بیشتری برای تحلیل مکانیکی نانو ساختارها را ایجاد می‌کند.

۱-۱-۳ دسته‌بندی نانو مواد

مواد در مقیاس نانو به دسته‌های زیر قابل تقسیم می‌باشند:

۱-۱-۳-۱ نانو لایه‌ها[1]

در عصر حاضر، تغییرات سطحی به یک فرآیند اساسی تبدیل شده است. در این مورد، روش‌هایی شامل ایجاد لایه‌های نازک یا پوشش‌ها بر روی سطوح، افزایش کارآیی و محافظت سطوح را به همراه دارد. رسوب یک لایه‌ی نازک برای پوشش‌دهی در اکثر صنایع جایگاه مهمی یافته است. نانو لایه‌ها دارای یک ساختار نانو ذره‌ای هستند که این ساختار یا از توزیع نانو ذرات در لایه ایجاد می‌شود و یا به وسیله‌ی یک فرآیند کنترل شده، یک نانوساختار در حین رسوب ایجاد می‌شود. فیلم‌های نانویی لایه‌ی نازک که بر روی سطح یک زیر پایه نشانده می‌شوند، عمدتاً کاربردهای الکترونیکی دارند که می‌توان به زیرلایه‌ها، خازن‌ها، قطعات حافظه، آشکارسازی مادون قرمز و راهنماهای موجی اشاره نمود [۴].

۱-۱-۳-۲ نانو پوشش‌ها[2]

پوشش‌ها دارای کاربردهای متنوعی از صنایع اتومبیل گرفته تا صنایع لوازم خانگی می‌باشد. این پوشش‌ها سطوحی را که در معرض آسیب‌های محیطی مانند باران، برف، نمک‌ها، رسوب‌های اسیدی، اشعه‌ی ماوراء بنفش، رطوبت و نور آفتاب می‌باشند، محافظت می‌نماید. همچنین، پوشش‌ها قابلیت خش برداشتن، تکه‌تکه شدن و یا آسیب‌دیدگی در زمان استفاده، ساخت و حمل و نقل را دارند. با یافتن راه‌هایی می‌توان از آسیب دیدن روکش‌ها جلوگیری نمود. فناوری نانو، ایجاد نانو پوشش‌ها را پیشنهاد می‌کند. نانو پوشش ها حفاظتی برای افزایش مقاومت در برابر خوردگی، افزایش سختی سطوح و حفاظت در مقابل عوامل مخرب محیطی می‌باشند. علاوه بر این، فناوری نانو از خش برداشتن، تکه تکه شدن و خورده شدن روکش‌ها جلوگیری می‌کند. از کاربردهای نانو پوشش‌ها می توان به روکش‌های ضد انعکاس در مصارف خودروسازی، روکش‌های محافظ و روکش‌های تزئینی اشاره نمود [۴].

۱-۱-۳-۳ نانو خوشه‌ها[3]

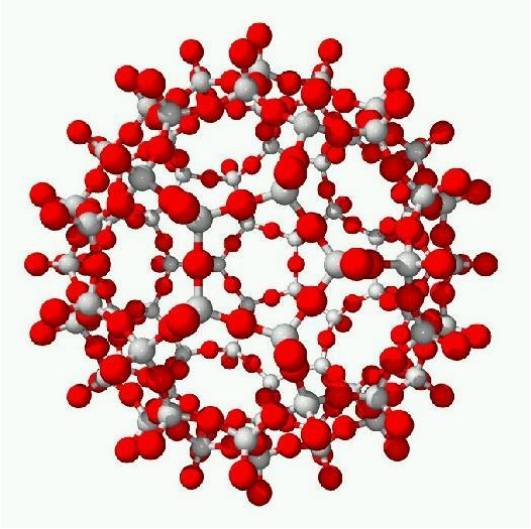
در اوایل دهه‌ی ۸۰ میلادی، فیزیکدانان کشف کردند که اتم‌های گازی فلزی به شکل حباب‌هایی پایدار و با تعداد اتم‌های

[1] Nanolayers

[2] Nanocoatings

[3] Nanocluster

مشخصی، مجتمع می‌شوند. در دهه‌ی ۹۰ میلادی، آنها اثر مشابهی را در کار بر روی سطوح مشاهده نمودند که اتم‌های گازی می‌توانند به شکل خوشه‌هایی با اندازه‌های ویژه روی سطح بچسبند. با توجه به تحقیقات و محاسبات، محققین دریافتند که اتم‌ها، سطح را برای پیدا کردن مکانی که به کمترین مقدار انرژی برسد، جستجو می‌کنند. آرایش‌های ۱ تا ۲ نانومتری از این خوشه‌ها، برای وسایل پیشرفته‌ی نوری و الکتریکی مناسب می باشند؛ زیرا الکترون‌های محبوس شده در این فضاها مجبور هستند که فوتون‌هایی با طول موج سفید ایجاد نمایند. اگر خوشه‌ها دارای خاصیت مغناطیسی شوند، می‌توانند برای وسایل ذخیره‌ی اطلاعات که بسیار فشرده هستند و کاتالیست‌ها برای واکنش‌های شیمیایی استفاده شوند [۴].

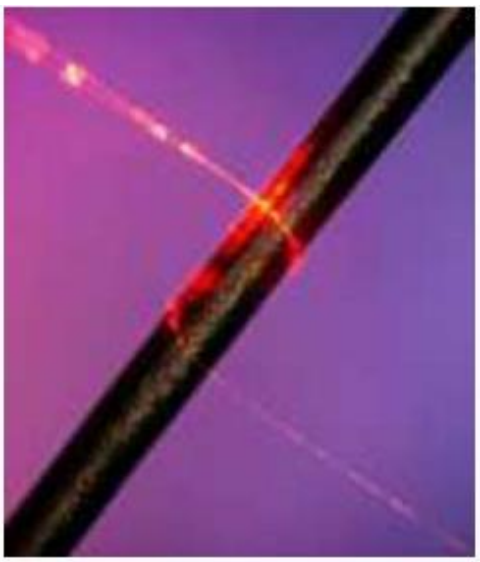


شکل (۱-۲): نمونه‌ای از نانو خوشه‌ها [۳]

۱-۱-۳-۴ نانو سیم‌ها[1]

در حالت کلی سیم به ساختاری گفته می‌شود که در جهت طولی گسترش داده شده و در دو جهت دیگر بسیار محدود باشد. یک خصوصیت مهم این ساختارها که دارای دو خروجی هستند، رسانایی الکتریکی می‌باشد. ساخت سیم‌هایی در ابعاد نانومتری، هم از نظر علمی و هم از نظر تکنولوژیکی مورد علاقه می‌باشد. زیرا در ابعاد نانومتری، خواص غیر معمولی از خود بروز می‌دهند. مثال‌هایی از کاربرد نانوسیم ها عبارتند از: وسایل مغناطیسی، سنسورهای شیمیایی، نشانگرهای بیولوژیکی و اتصالات داخلی در نانوالکترونیک مانند اتصال دو قطعه‌ی ابررسانای آلومینیومی که توسط نانو سیم نقره صورت می‌گیرد [۴].

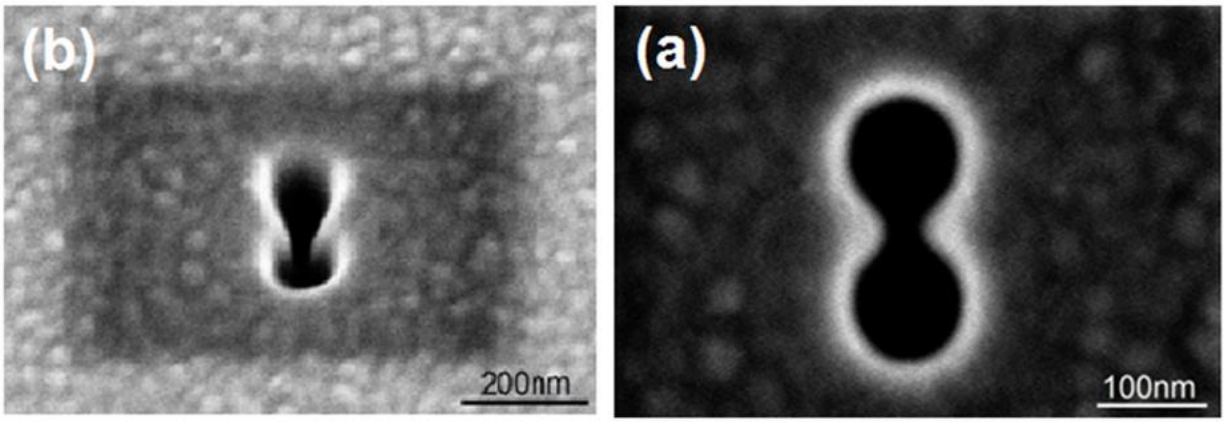
[1] Nanowires



شکل (۱-۳): نمایی از نانو سیم [۳]

۱-۱-۳-۵ نانو حفره‌ها[1]

مواد با اندازه‌های حفره‌ای در محدوده‌ی نانومتری، کاربردهای صنعتی جالبی را از خود بروز می دهند. بـه دلیـل ویژگـی ممتـاز آن‌ها با توجه به عایق حرارتی بودن، رهایش مواد کنترل شده و کاربردشان، آن‌ها به عنوان پرکننده‌هـایی بـرای کاتالیزورهـا در علم شیمی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. این گروه از مواد، پتانسیل بالایی در کاتالیست‌هـا، عـایق‌هـای حرارتـی، مـواد الکتـرودی، فیلترهای محیطی و غشاها دارا می‌باشند [۴].



(ب) (الف)

شکل (۱-۴): تصاویر SEM نانو حفره‌ی دوبل طلا (الف) عکس‌برداری شده بر روی سطح نرمال (ب) عکس‌برداری شده تحت زاویه‌ی ۳۵° [۳]

[1] Nanoholes