وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه
گاوازنگ - زنجان

تله اندازی نوری نانوذرات فلزی

پایان‌نامهٔ دکتری

فائقه حاجی زاده

استاد راهنما: **دکتر سید نادر سیدریحانی**

مهر ۱۳۹۰

جهان را بلندی و پستی تویی

ندانم چه ای، هرچه هستی تویی

(فردوسی)

روی مقصود که شاهان به دعا می طلبند

مظهرش آینه طلعت درویشانست

تقدیم به آن مهربانان

پدر و مادرم

سپاس‌گزاری..

سپاس خدایی را که ستودن نداند کس او را چو هست.

از معلمان عشق، پدر و مادرم، که کوشیدند چگونه زیستن را به من بیاموزند و از برادرهایم و خانواده‌شان که در فراز و نشیب‌های زندگی همواره حضور پررنگشان را در کنار خود احساس کرده‌ام، بینهایت متشکرم.

از دکتر ریحانی که در این سال‌ها علاوه بر آموخته‌های علمی، درس‌های زندگی نیز از ایشان یاد گرفتم، سپاس‌گزارم. از کسانی که مرا در انجام این پروژه یاری کردند: آقای احسان اخلاقی به دلیل مشورت‌هایی که در زمینه‌ی تداخل‌سنجی با ایشان داشتم، خانم زینب خاکسار به دلیل همکاری که در قسمت آشکارسازی مکان ذره داشتند و آقای طوماری برای زحماتی که در قسمت ساخت قطعات کشیدند، متشکرم. از همه‌ی بچه‌های گروه انبرک نوری و همه‌ی کسانی که محیطی دوستانه در آزمایشگاه‌های اپتیک به‌وجود آوردند، سپاسگزارم.

از بنیان‌گذاران دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان به دلیل ایجاد محیطی آرام و پویا و همه‌ی کسانی که برای پربار کردن محیط علمی و آزمایشگاهی این دانشگاه زحمت فراوان کشیده‌اند، متشکرم.

از همه‌ی دوستان همیشه پیوسته‌ام: سارا، لاله، ساره، خدیجه که در کنار هم بزرگ شدن را تجربه کردیم و دوستان غیر پیوسته‌ام: مریم، اکرم.ر، آزاده، ربابه، اکرم.ع، نرگس، آرام، صغرا و همه‌ی بچه‌های خونگرم والیبال و مربی‌ام خانم گل پیکری و بچه‌های ساختمان هفت به دلیل تمام لحظه‌های شاد و تاثیرگذاری که در کنارشان داشتم، بینهایت متشکرم.

چکیده

انبرک نوری در اصل یک باریکه‌ی لیزر با توزیع شدت گاوسی است که توسط یک عدسی با گشودگی عددی بالا کانونی شده است. به‌وسیله‌ی انبرک نوری می‌توان به ذرات میکرونی با ضریب‌شکست بزرگتر از محیط اطراف، نیروی پیکونیوتنی وارد کرد. این نیرو با انتقال تکانه‌ی نور به جسم ایجاد می‌شود. در طول دو دهه‌ی گذشته انبرک نوری به ابزار بسیار مهمی در پژوهش در زمینه‌های مختلف علوم شده است. در مطالعات زیست شناختی با توجه به پیشرفت‌های وسیع در این زمینه، استفاده از تکنیک انبرک نوری برای بررسی نیروهای ساختاری درون ماکرومولکول‌های زیستی بسیار مورد توجه قرارگرفته است. در این مطالعات، میکروکره‌های دی‌الکتریک به عنوان دستگیره‌ای برای پلیمرهای زیستی استفاده می‌شوند و با کمک میکروکره‌ها به پلیمرهای مذکور نیرو وارد می‌شود. با این‌وجود ذرات دی‌الکتریک در اندازه‌های کوچکتر به دلیل قطبش‌پذیری کم به راحتی به تله نمی‌افتند.

در مطالعات اخیر، نشان داده شده است که بهره‌ی تله برای ذرات فلزی در حد ریلی، چندین برابر بیشتر از ذرات دی‌الکتریک است. این مسئله امید فراوانی برای استفاده از نانوذرات فلزی در بررسی دقیق‌ترِ سلول‌های زیستی به‌وجود آورده است. از موارد کاربرد آن این است که نانوذرات فلزی را می‌توان به داخل سلول‌های زیستی فرستاد و با تله انداختن این ذرات در داخل سلول زنده، میکرودستکاری‌های مختلف مانند اِعمال نیرو به اجزای داخلی سلول و یا ایجاد گرمای موضعی در داخل سلول انجام داد. در این پایان‌نامه قدرت تله را برای نانوذرات کروی طلا بررسی می‌کنیم. علت استفاده از نانوذرات طلا، ویژگی‌های نوری و کاربردهای منحصربه‌فرد آن است. نانوذرات طلا در قطرهای مختلف بین ۹/۵ تا ۲۵۴ نانومتر در چیدمان انبرک نوری به تله افتادند و وابستگی قدرت تله به اندازه‌ی ذره را بررسی کردیم. در این بررسی با بهینه‌سازی انبرک نوری از طریق کمینه کردن ابیراهی کروی و بهینه‌کردن توان

لیزر، توانستیم کوچکترین حجمی را که تاکنون در یک تله‌ی نوری به صورت پایدار تله‌اندازی شده است($\sim ۵۰۰nm^۳$)، گزارش کنیم. این اندازه نصف رکورد قبلی است. همچنین اندازه‌گیری بیشینه نیروی تله بر نانوذرات فلزی، افزایش ۴ برابر بازدهی تله را نسبت به کارهای قبلی نشان می‌دهد. با توجه به افزایش دمای نانوذرات فلزی در تله‌ی نوری استفاده از توان کمتر برای تله، نقش مهمی در افزایش کارایی نانوذرات دارد.

نانوذرات فلزی در تله‌ی نوری با توجه به وجود الکترون‌های آزاد بر روی سطح آنها، گرمای زیادی تولید می‌کنند. امروزه اندازه‌گیری دمای سطح نانوذراتِ فلزی در استفاده از آنها با لیزر، یک چالش بزرگ به حساب می‌آید. در ادامه‌ی این پروژه دمای نانوذره در کانون لیزر را با استفاده از ذوب‌شدن میکروسکوپی پارافین جامد تخمین زدیم. با افزایش توان لیزر برروی نانوذره، شعاع منطقه ذوب‌شده در اطراف نانوذره به‌صورت میکروسکوپی افزایش می‌یابد. از مزیت‌های عمده‌ی این روش می‌توان به کم‌هزینه بودن آن اشاره کرد.

کار بعدی که در این پایان‌نامه شرح می‌دهیم، در زمینه‌ی آشکارسازی مکان ذره در تله‌ی نوری است. رایج‌ترین روش برای اندازه‌گیری جابه‌جایی ذرات تله‌شده در انبرک نوری، استفاده از طرح تداخلی نور مستقیم و پراکنده از جسم در صفحه‌ی کانون پشتی عدسی چگالنده است. در این روش یک فوتودیود چهارشاخه توزیع شدت در صفحه‌ی کانون پشتی را ثبت می‌کند. در این پروژه با اندازه‌گیری جابه‌جایی ذره در صفحه‌ی تصویر جسم، نشان دادیم که آشکارسازی در این صفحه‌ی نوری، در شرایط خاصی نسبت به صفحه‌ی کانون پشتی برتری دارد.

واژه‌های کلیدی: *تله‌ی نوری، نانوذرات فلزی، اندازه‌گیری دمای تله نوری، آشکارسازی مکان ذره*

فهرست

پیش‌گفتار . . . . . ده

۱ نانوذره: ویژگی و کاربرد **۱**

۱.۱ مقدمه ۱

۲.۱ ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی نانوذرات ۳

۱.۲.۱ ویژگی‌های نوری نانوذرات ۷

۳.۱ روش‌های تولید ۱۳

۴.۱ کاربرد نانوذرات ۱۵

۲ تله‌اندازی نوری ذرات کوچک **۲۱**

۱.۲ مقدمه ۲۱

۲.۲ تاریخچه‌ی انبرک نوری ۲۲

۳.۲ مبانی نظری نیروی انبرک نوری ۲۶

۱.۳.۲ حدّ اپتیک هندسی ۲۷

۲.۳.۲ حدّ ریلی ۲۹

۴.۲ روش‌های اندازه‌گیری نیروی انبرک نوری ۳۳

۱.۴.۲ روش طیف توان ۳۳

۲.۴.۲ روش همپاری انرژی ۳۴
۳.۴.۲ روش تحلیل انرژی پتانسیل نوری ۳۵
۴.۴.۲ روش مقاومت سیال ۳۵
۵.۲ چیدمان انبرک نوری ۳۶
۶.۲ تاریخچه‌ی تله‌اندازی نوری نانوذرات فلزی ۴۰

۳ نانوذرات طلا در تله‌ی نوری **۴۱**
۱.۳ مقدمه ۴۱
۲.۳ چیدمان انبرک نوری ۴۴
۳.۳ تفاوت تله‌اندازی نانوذرات و ذرات میکرونی ۴۶
۴.۳ آماده‌سازی نمونه ۴۷
۵.۳ اندازه‌گیری قدرت تله ۴۹
۱.۵.۳ روش طیف توان ۵۰
۲.۵.۳ روش تحلیل انرژی پتانسیل نوری ۵۹
۳.۵.۳ روش مقاومت سیال ۶۲
۶.۳ بحث در نتایج ۶۵

۴ اثر گرمایی تله‌ی نوری بر نانوذرات فلزی **۶۸**
۱.۴ مقدمه ۶۸
۲.۴ مشاهدات کیفی اثر گرمایی تله‌ی نوری بر نانوذرات ۶۹
۱.۲.۴ اثر افزایش دمای نانوذرات در مواد مختلف ۷۴
۳.۴ رهیافت نظریِ تعیین دمای یک نانوکره‌ی فلزی در تله‌ی نوری ۷۷
۴.۴ اندازه‌گیری دمای‌نانوذره‌ی طلا در کانون لیزر ۸۰
۱.۴.۴ آماده‌سازی نمونه ۸۰

۲.۴.۴ روش تداخل‌سنجی ۸۴
۳.۴.۴ اندازه‌گیری تغییر ضریب شکست گلیسیرین با دما ۸۵
۵.۴ بحث در نتایج ۸۹

۵ استفاده از صفحه‌ی تصویر شیء برای اندازه‌گیری مکان ذره در تله‌ی نوری ۹۰
۱.۵ مقدمه ۹۰
۲.۵ ملاحظات آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری مکان ذره ۹۱
۳.۵ مدل نظری برای اندازه‌گیری مکان ذره ۹۷
۱.۳.۵ آشکارسازی مکان ذره در صفحه‌ی کانون پشتی چگالنده ۹۷
۲.۳.۵ آشکارسازی مکان ذره در صفحه‌ی تصویر شیء ۱۰۰
۴.۵ بحث در نتایج ۱۰۲
۵.۵ کار پیش‌رو ۱۰۳
واژه‌نامه فارسی به انگلیسی ۱۱۳

پیش‌گفتار

در بررسی‌ها و مطالعاتی که با انبرک نوری انجام می‌شود، به‌طور معمول از میکروکره‌های دی‌الکتریک به عنوان گیره استفاده می‌کنند. در این بررسی‌ها، میکروکره‌ها به‌وسیله‌ی پیونددهنده‌های زیستی به ماکرومولکول‌ها و یا سلول‌های زیستی متصل می‌شوند و به کمک انبرک نوری نیروهای ساختاری آنها بررسی می‌گردد. ابعاد این کره‌ها در برخی از بررسی‌ها، به دلیل بزرگی اندازه، محدودیت ایجاد می‌کند. اخیراً مطالعاتی در زمینه‌ی تله‌اندازی نوری نانوذرات آغاز شده است. در این پایان‌نامه قصد داریم ویژگی‌های تله‌ی نوری را برای نانوذرات طلا بررسی کنیم. نتیجه‌ی این بررسی می‌تواند به گسترش کاربرد انبرک نوری در بررسی خواص فیزیکی-زیستی در اندام‌های کوچک کمک کند. علاوه براین با توجه به اینکه نانوذرات فلزی خواص گرمایی منحصربه‌فردی دارند، ترکیب نانوذرات فلزی و انبرک نوری در گرم کردن هدفمند اندامک‌های زیستی و از بین بردن بافت‌های سرطانی کاربرد دارد.

در سال‌های اخیر به خوبی اثبات شده است که نانومواد ویژگی‌ها و رفتارهایی دارند که در مقایسه با مواد شیمیایی با ترکیبات مشابه، اما در مقیاس بزرگتر، بسیار متفاوت است. در طول سه دهه‌ی اخیر کاربرد نانوذرات توسعه‌ی چشم‌گیری داشته و به علت خواص ویژه‌ی آنها در علوم مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند. امروزه کنترل قابل توجهی بر روی اندازه، شکل و یکنواختی آنها صورت می‌گیرد. در فصل اول این پایان‌نامه خلاصه‌ای از ویژگی‌ها و کاربردهای نانوذرات را بیان می‌کنیم.

فصل دوم مقدمه‌ای درمورد انبرک نوری است. در این فصل تاریخچه‌ی تله‌اندازی نوری و چگونگی اندازه‌گیری نیروی تله را به‌صورت نظری و آزمایشگاهی شرح می‌دهیم.

فصل سوم گزارشی از بررسی تله‌اندازی نوری نانوذرات طلا است، که در آزمایشگاه انبرک نوری دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم‌پایه زنجان انجام داده‌ایم. این فصل شامل آماده‌سازی نمونه، ملاحظات آزمایشگاهی، و نتایجی است که در این بررسی به‌دست آوردیم.

در طول آزمایش‌های تله‌اندازی نانوذرات، پدیده‌های میکروسکوپی مختلفی به‌علت افزایش دمای سطح نانوذره در تله‌ی نوری مشاهده کردیم. گزارشی از این مشاهدات کیفی در فصل چهار آمده است. علاوه براین یک روش کم‌هزینه برای اندازه‌گیری دمای نانوذرات فلزی ارائه کرده‌ایم که در این فصل به آن می‌پردازیم.

فصل پنجم درمورد آشکارسازی مکان ذره در تله‌ی نوری است. در این فصل اندازه‌گیری مکان ذره در تله‌ی نوری را در صفحه‌ی تصویر جسم به صورت تجربی و نظری بررسی می‌کنیم. این مطالعه برای میکروکره‌های دی‌الکتریک انجام شده و در واقع مستقل از فصل‌های قبلی است.

فصل اول

نانوذره: ویژگی و کاربرد

۱.۱ مقدمه

اندازه‌ی یک نانوماده، حداقل در یک بعد، بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. از نظر منشأ تولید، نانومواد را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

- نانومواد طبیعی که در طبیعت وجود دارند (مانند نانوپلیمرها، ماکرومولکول‌های زیستی یا ذرات معدنی مانند غبار) یا از طریق وقایع طبیعی مانند آتش‌فشان یا آتش‌سوزی جنگل به‌وجود می‌آیند.
- نانومواد ناخواسته که محصول جانبی فرایندهای صنعتی هستند. مانند نانومواد‌ی که در حین جوشکاری به‌وجود می‌آیند.
- نانومواد مصنوعی که ساخته‌ی دست انسان هستند و به‌صورت هدفمند تولید می‌شوند. این مواد به علت داشتن خواص فیزیکی و شیمیایی خاص و واکنش‌پذیریی بالا، بسیار مورد توجه قرار گرفته و کاربردهای وسیعی در زمینه‌های مختلف پیدا کرده‌اند.

امروزه طیف وسیعی از نانوذرات مهندسی‌شده از مواد شیمیایی مختلف مانند فلز، نیمه‌رسانا و دی‌الکتریک در اندازه و شکل‌های مختلف ساخته می‌شوند. با توجه به مطالعات گسترده در مورد نانومواد در سال‌های اخیر، به خوبی اثبات شده است که نانومواد ویژگی‌ها و رفتارهایی دارند که در مقایسه با مواد شیمیایی با ترکیبات مشابه اما در مقیاس بزرگتر، بسیار متفاوت است. اندازه، شکل و مساحت از جمله ویژگی‌هایی هستند که این تفاوت‌ها را ایجاد می‌کنند. به عنوان مثال فلزات در ابعاد نانو سخت‌تر و مواد سرامیکی نرم‌تر می‌شوند [۱].

یکی از ویژگی‌های خاصّ در برخی از نانومواد، نمایان شدن اثرهای کوانتومی با کوچکتر شدن اندازه‌ی ذره است. نانوذرات از جنس نیمه‌رسانا که نقاط کوانتومی[۱] نامیده می‌شوند، مثالی از این نوع هستند. از آنجاکه الکترون‌های آزاد این مواد، مانند الکترون‌های مقید در اتم‌ها، حالت‌های گسسته و مجاز انرژی را اشغال می‌کنند، به این ذرات گاهی اتم‌های مصنوعی نیز گفته می‌شود. نقاط کوانتومی که از موادی مانند سولفید سرب، سولفید روی، فسفات ایندیوم ساخته می‌شوند، پس از تحریک الکترون‌ها با استفاده از یک منبع نوری، طول موج معینی از نور را بسته به اندازه، از خود ساطع می‌کنند. این ذرات به صورت نمایانگر فلورسانس عمل می‌کنند، اما برخلاف ذرات با خاصیت فلورسانی معمول، در برابر درخشان شدن، خاصیت و توانایی خود را از دست نمی‌دهند[۲]. این ویژگی باعث کاربردهای فراوان برای نقاط کوانتومی در تشخیص پزشکی و زیست‌دارویی شده است [۲].

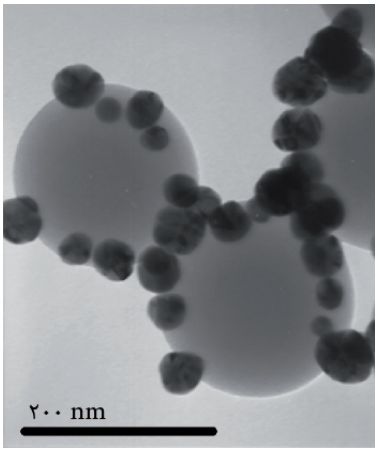
با وجود کاربردهای رو به رشد نانومواد در چند دهه‌ی اخیر، استفاده از نانوذرات به زمان‌های دور برمی‌گردد. اولین استفاده از نانوذرات در لعاب‌های چینی و سرامیک‌های تزئینی در قرن چهار و پنج میلادی گزارش شده است. جام لیکرگوس[۳] یک جام رومی معروف است که در آن از نانوذرات طلا استفاده شده است تا رنگ‌های متفاوتی از جام بر حسب نحوه‌ی تابش نور (از داخل جام یا بیرون آن) پدید آید. رفتار متفاوت برهم‌کنش نانوذرات طلا در بازتابش یا عبورِ پرتوهای نور، عامل اصلی این

---

۱ quantum dots

۲ bleaching

۳ Lycurgus cup



شکل ۱.۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از کره‌های پلی‌استایرن که توسط نانو کره‌های نقره پوشیده شده‌اند [۴].

تغییر رنگ است. البته علت چنین اثراتی برای سازندگان آن ناشناخته بود. علاوه براین کربن سیاه[۱] نانوماده‌ای است که سال‌ها در تایر اتومبیل به منظور افزایش طول عمر آن به‌کار رفته است [۳].
در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه‌ی ساخت نانوذرات از مواد گوناگون شده است و کنترل قابل توجهی بر روی اندازه، شکل و یکنواختی آنها صورت گرفته است. در این راستا توسعه‌ی تکنیک‌های میکروسکوپی الکترونی، در درک عمیق‌تر از نانومواد تولید شده مؤثر بوده است. شکل ۱.۱ یک نمونه از تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) را نشان می‌دهد. این تصویری از کره‌های پلی‌اِستایرن است که توسط نانوکره‌های نقره پوشیده شده‌اند.

۲.۱ ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی نانوذرات

با تغییر اندازه‌ی ذره از میکرو به نانو، در خواص فیزیکی و شیمیایی ماده تغییرات زیادی ایجاد می‌شود. علاوه برآن نانومواد به دلیل گوناگونی زیاد، ویژگی‌های فراوان و متفاوتی از خود نشان می‌دهند. برای توصیف تفاوتِ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیاییِ نانومواد در کتاب‌ها و مقالات، اغلب از اصطلاح

[۱] black carbon

منحصر به فرد[1] استفاده می‌شود [۵]. این رفتار متفاوت را حتی زمانی که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، نسبت به ذرات مشابهِ درشت‌دانه‌تر تغییر نکند نیز می‌توان مشاهده کرد. به عنوان مثال مقیاس نانویی ابعاد ذره به آن توانایی عبور از منافذی را می‌دهد که برای ذرات درشت‌دانه‌تر نفوذ ناپذیر هستند.

در تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نانومواد، مشخصاتی مانند اندازه، مساحت، شکل، جنس نانوذره و محیط اطراف تعیین‌کننده هستند. در ادامه نحوه‌ی تأثیر این مشخصات را بر روی ویژگی‌های نانوذره با جزئیات بیشتری شرح می‌دهیم.

اندازه‌ی ذره

اندازه‌ی ذره نقش اساسی در تعیین ویژگی‌های نانوذره دارد. نتیجه‌ی بررسی‌ها نشان می‌دهد که فعالیت زیستی نانومواد با کاهش اندازه‌ی ذره افزایش می‌یابد. افزایش مساحت به حجم که بتدریج با کاهش اندازه‌ی ذره رخ می‌دهد، باعث می‌شود تعداد بیشتری از اتم‌هادر سطح خارجی ذره قرار گیرند و افزایش سطح، واکنش‌پذیری نانوذرات را به شدت افزایش می‌دهد. این پدیده بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نانوذره و میزان واکنش‌پذیری آن با دیگر مواد اثر می‌گذارد. به عنوان مثال پایداری و مقاومت طلا در برابر اکسیدشدن زیاد است. ولی هنگامی که اندازه‌ی ذرات طلا به چند ده نانومتر برسد، در صورت قرار گرفتن در معرض هوا به سرعت اکسید می‌شوند [۶]. علاوه بر این، در یک جرم ثابت، کوچک شدن اندازه‌ی ذرات به معنی بیشتر شدن تعداد ذراتِ درتماس است که این خود به افزایش واکنش‌پذیری آنها کمک می‌کند.

نانوذرات به علت واکنش‌پذیری بیشتر ممکن است خواص سمّی از خود نشان دهند. به عنوان مثال نانوذرات معلق در هوا از طریق تنفس در بدن می‌توانند از راه ریه و عبور از مجاری هوایی که اندازه‌ای بین ۲ تا ۴ میکرون دارند، وارد بدن شوند. درحالی‌که مواد درشت‌دانه‌تر نمی‌توانند از این سدهای

[1] uniqueness

فیزیولوژیکی عبور کنند. سم‌شناسی نانوذرات[۱] شاخه‌ی جدیدی در علم است که به بررسی تأثیرات ذرات و مواد نانو بر سلامت انسان و بهداشت محیط زیست می‌پردازد [۲]. افزایش واکنش‌پذیری نانوذرات مزایایی نیز به همراه دارد. افزایش سطح به حجم، باعث بهبود کارایی کاتالیزوها و ساختارهایی مانند الکترودها می‌شود. بنابراین با استفاده از این خاصیت می‌توان کارکرد کاتالیزورهای شیمیایی را به نحو مؤثری بهبود بخشید. در تولید نانو کامپوزیت‌ها[۲] نیز استفاده از این ذرات، پیوندهای شیمیایی محکم‌تری بین ماده‌ی زمینه و ذرات برقرار می‌کند و به افزایش استحکام آن کمک می‌کند. استفاده از نانوذرات در کامپوزیت‌ها، بسیاری از خواص از جمله نوری، الکترونیکی، مغناطیسی، شیمیایی و حرارتی آن را تغییر می‌دهد.

کوچک شدن اندازه‌ی ذره باعث تغییر در خواص ترمودینامیکی ماده نیز می‌شود. افزایش سطح ذرات، فشار سطحی جسم را کاهش داده و باعث تغییر فاصله‌ی بین اتم‌های ذرات می‌شود. تغییر در فاصله‌ی بین اتم‌های ذرات، تأثیر متقابلی در ویژگی‌های ماده دارد. تغییر در انرژی آزاد سطح، پتانسیل شیمیایی را تغییر می‌دهد. این امر در خواص ترمودینامیکی ماده مانند نقطه ذوب اثرگذار است. به طور مثال نقطه‌ی ذوب نانوذرات فلزی با کوچک شدن اندازه‌ی ذره کاهش می‌یابد و روند تغییر در دمای نقطه ذوب در اندازه‌های کوچکتر، بیشتر است [۷].

شکل ذره

امروزه نانومواد در شکل‌ها و ساختارهای گوناگونی مانند کره، میله، هرم، لوله، ورقه (پوسته) و ... ساخته می‌شوند. شکل ذره به دو صورت در رفتار و کاربرد نانوذره اثر دارد. اول اینکه توانایی جابه‌جا شدن و انتشار ماده در فازهای گاز و مایع به شکل ذره بستگی دارد. به طور مثال ضریب پخش به شکل هندسی ذره وابسته است [۸]. دوم، توانایی جذب و جایگزینی یک ذره در محیط‌های زیستی به شکل

---

[۱] nanoparticle toxicity

[۲] در مهندسی مواد، کامپوزیت به ماده‌ای گفته می‌شود که از یک فاز زمینه و یک تقویت‌کننده تشکیل شده باشد. فایبرگلاس یک کامپوزیت با زمینه‌ی پلیمری است که توسط فیبرهای شیشه تقویت شده است. نانو کامپوزیت‌ها، کامپوزیت‌هایی هستند که اندازه‌ی یک یا چند جزء آنها کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد.

ذره بستگی دارد [۲].

ترکیب شیمیایی

ساختار شیمیایی و مولکولی، ویژگی ذاتی ماده و در نتیجه عامل مهمی در توصیف رفتار فیزیکی و شیمیایی نانوذرات است. امروزه نانومواد با ترکیبات شیمیایی بسیار متفاوت ساخته می‌شوند و طیف وسیعی از مواد غیرآلی مانند طلا، نقره، آهن، نیکل، روی، تیتانیم و پلاتین تا اکسیدهای فلزی مانند اکسید تیتانیم، اکسید روی، سیلیکا و اکسید آهن تا مواد آلی مانند نانو لوله‌های کربنی، نانوپلیمرها و ماکرومولکولهای زیستی را در بر می‌گیرند. خلوص شیمیایی ماده نیز در خصوصیات شیمیایی ماده مؤثر است. در روش‌های تولید برخی از نانومواد مانند نانولوله‌های کربنی ممکن است ناخالصی‌هایی مانند آهن، نیکل و کبالت وارد شود که از طریق غلبه بر رفتار نانوذره بر چگونگی واکنش‌پذیری آنها اثر می‌گذارد [۳].

شبکه ساختاری

بسیاری از مواد با ترکیب شیمیایی مشابه، ممکن است شبکه ساختاری متفاوتی داشته باشند و در نتیجه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی گوناگونی از خود نشان دهند. به عنوان مثال کوارتز از اتم‌های سیلیکون و اکسیژن با نسبت سیلیس به اکسیژن یک به دو تشکیل شده است، که با توجه به روش ساخت و شرایط دمایی مورد استفاده، این ترکیب را می‌توان با شبکه ساختاری متفاوت تولید کرد. مطالعات نشان می‌دهند که نوع شبکه ساختاری نقش مهمی در خصوصیات کلی نانوذرات دارد. این امر به دلیل نسبت بالای اتم‌های سطحی در شکل شبکه‌ای در مقایسه با شکل‌های غیر کریستالی است. ساختارهای کریستالی ممکن است با کاهش اندازه‌ی ذره نامنظم شوند. با توجه به این مسئله، خواص نانوماده نسبت به مواد درشت‌دانه‌تر تغییر می‌کند. به‌طور مثال یک فرم کریستالی از دی اکسید تیتانیم در مقیاس ماکروسکوپی، پایدار اما در مقیاس نانو ناپایدار است. دی‌اکسید تیتانیم یک کاتالیزور قدرتمند است که می‌تواند انرژی خورشید را گرفته و به تجزیه مولکول‌ها کمک کند [۲].

شیمی سطح

هرچه ذره کوچکتر شود، نیروهای بین ذره‌ای که نانوذرات را به سمت یکدیگر جذب می‌کنند، قوی‌تر می‌شوند. به‌طوریکه نانوذرات تمایل بسیار زیادی به انباشتگی[۱] پیدا می‌کنند. ذرات انباشته‌شده رفتاری متفاوت از حالتی که به صورت منفرد و تکی هستند، از خود نشان می‌دهند. هنگامی که نیروی وان‌دروالس بین ذرات باعث ایجاد توده (پیوند شیمیایی بین ذرات) شود، آنچه که حاصل می‌شود، یک ماده‌ی نانو ساختاری است که دیگر نمی‌توان آن را به صورت نانوذره در نظر گرفت. نانوذرات مهندسی‌ساز به ویژه آنهایی که کاربردهای زیستی-پزشکی دارند، اغلب به کمک روکش‌های خاصی مانند پلیمرها پوشیده می‌شوند تا از تشکیل توده و انباشتگی و همچنین خوردگی جلوگیری شود. با توجه به نوع کاربرد نانوذرات، پوشش سطحی آنها با مواد آب‌دوست یا آب‌گریز انجام می‌شود.

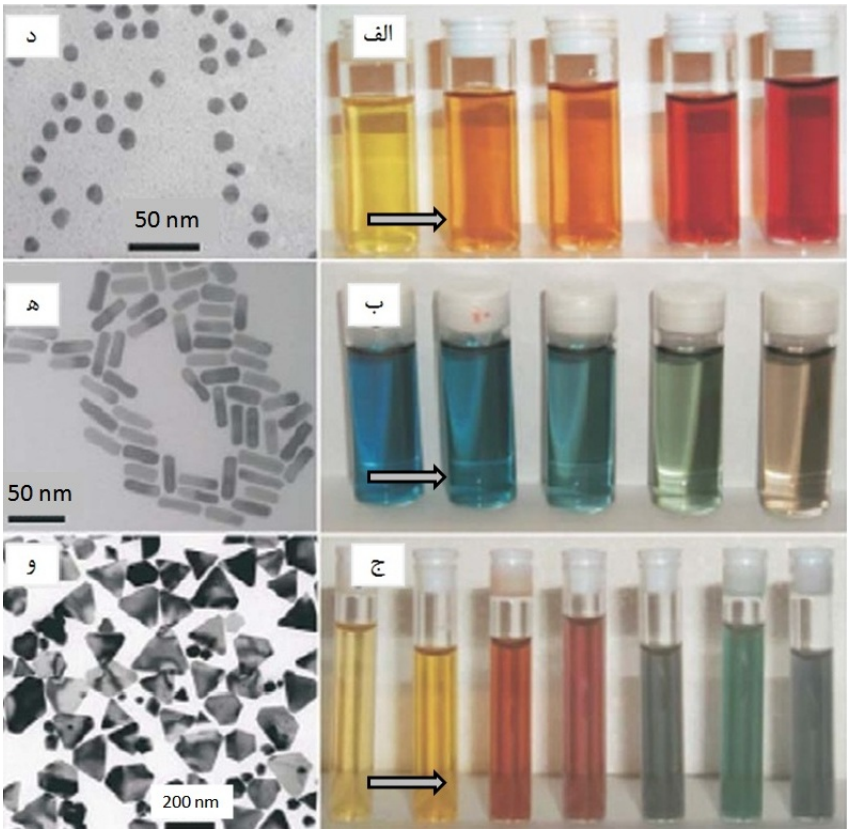
۱.۲.۱ ویژگی‌های نوری نانوذرات

مقیاس طولِ امواج الکترومغناطیسی، طول موج است. اندازه‌ی طول موج در طیف مرئی قابل مقایسه با اندازه‌ی نانوذره است. درنتیجه خواص نوری نانوذرات مانند جذب، بازتاب یا عبور، شدیداً تحت تأثیر اندازه و شکل نانوذره قرار می‌گیرد. یک مثال ساده از ویژگی نوری نانوذرات، رنگ آنها است. کوچکتر بودن ابعاد نانوذرات از طول موج نور مرئی، آنها را نامرئی و شفاف می‌نماید. علاوه براین میدان‌های الکترومغناطیسی با بار الکتریکی برهم‌کنش می‌کنند، بنابراین می‌توانند بخشی از انرژی الکترومغناطیسی خود را به هر باری که با آن روبه‌رو می‌شوند، منتقل کنند. نانوذرات فلزی دارای بار آزاد سطحی بیشتری هستند و اثرپذیری از امواج الکترومغناطیسی در آنان بیشتر مشاهده می‌شود. شکل ۲.۱ وابستگی رنگ محلول‌های کلوئیدی نانوذرات طلا و نقره را به اندازه و شکل ذره نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، رنگ محلول بسیار وابسته به جنس، اندازه و شکل هندسی و ساختاری ذرات است.

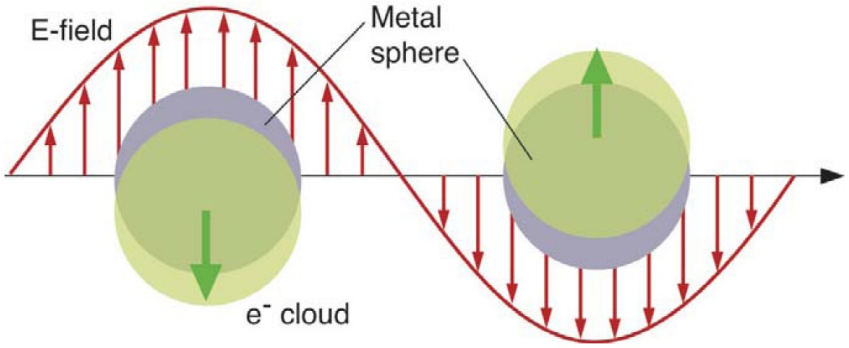
امروزه خواص و کاربردهای فوتونیکی نانو ساختارهای فلزی مانند نانوکره‌ها، نانومیله‌ها و نانوپوسته‌های

---

[۱] aggregation



شکل ۲.۱: الف) محلول نانوذرات کروی طلا و نقره در آب. در جهت فلش غلظت طلا در مقایسه با غلظت نقره در حال افزایش است. ب) محلول کلوئیدی نانومیله‌های طلا که در جهت فلش نسبت طول به عرض میله‌ها در حال افزایش است. ج) محلول کلوئیدی نانومنشورهای نقره که در جهت فلش اندازه‌ی منشور، بزرگ می‌شود. د-و) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از نانوذرات سمت راست [۹].



شکل ۳.۱: برهم‌کنش نانوذره‌ی فلزی با میدان الکتریکی.

فلزی تحت عنوان پلاسمونیک[۱] گسترش یافته است. اساس پدیده‌ی پلاسمونیک، نوسان الکترون‌های سطحی فلز توسط سیگنال نوری است. از آنجا که نوسان الکترون‌ها توسط تحریکات اپتیکی به مرز میان فلز-دی‌الکتریک (محیط اطراف) محدود می‌شود، این موجِ محدود شده در مرز را پلاسمون سطحی[۲] می‌نامند. این نوسانات با دور شدن از سطح فلز به صورت نمایی کاهش می‌یابد. شکل ۳.۱، نوسان ابر الکترونی روی سطح یک نانوذره را، تحت تأثیر میدان الکتریکی، به‌صورت طرح‌واره نشان می‌دهد.

بررسی پلاسمون‌ها با حل معادلات الکترومغناطیس ماکسول و اِعمال شرایط مرزی امکان‌پذیر است. با استفاده از پراکندگی ریلی برای یک کره با شعاع a که بسیار کوچکتر از طول موج است ($a \ll \lambda$)، سطح مقطع پراکندگی و جذب از روابط زیر به‌دست می‌آیند [۱۰]:

$$C_{scat} = ۴\pi k^۴ a^۶ \left| \frac{\epsilon_p - \epsilon_m}{\epsilon_p + ۲\epsilon_m} \right|^۲ \qquad (۱.۱)$$

$$C_{abs} = \frac{۴\pi}{۳} k a^۳ \frac{\epsilon''_p}{\epsilon_m} \left| \frac{۳\epsilon_m}{\epsilon_p + ۲\epsilon_m} \right|^۲$$

ک$\epsilon_p(\lambda) = \epsilon'_p(\lambda) + i\epsilon''_p(\lambda)$ ثابت دی‌الکتریک کره (پارامتر وابسته به طول موج) و ϵ_m ثابت دی‌الکتریک محیط اطراف، و k عدد موج هستند. می‌توان دید اندازه، شکل و ضرایب دی‌الکتریک ذره و محیط اطراف هر کدام در مقدار جذب و پراکندگی از نانوذرات فلزی اثرگذار هستند.

---

۱ plasmonics

۲ surface plasmone