مروری بر روش های اندازه گیری و محاسبه پارامترهای فیزیکی نانوذرات

بهمن رحمتی نژاد[۱]، فرزین عظیم پور شیشوان[۱]، هادی قاسمی زوارق[۱]

[۱]گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

چکیده

نانو ذرات به ذراتی اطلاق می‌شود که اندازه آن‌ها در مقیاس نانو (محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) قرار دارد. به دلیل اندازه بسیار کوچکشان، این ذرات خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی منحصر به فردی دارند که با ابعاد بزرگ‌تر متفاوت است. اندازه گیری پارامترهای فیزیکی نانوذرات از جمله محاسبه قطر؛ حجم؛ جرم؛ غلظت مولی و سطح ویژه آنها از ویژگی های اساسی بوده و در این تحقیق روش های و ابزارهایی که جهت محاسبه این موارد لازم است با توجه به منابع موجود جمع آوری و مورد بحث قرار گرفت. نتایج بررسی نشان داد برای تعیین قطر نانو ذرات از روش های SLS؛ DLS؛ XDR و AFM استفاده می شود. با تحلیل تصاویر دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) در برنامه Imagej/Fiji و به کمک روابط ارائه شده برای حجم نانو ذرات می توان حجم آنها را محاسبه کرد. از روش های جذب گاز، جذب مولکول از محلول و روش جذب متیلن آبی به منظور بررسی سطح ویژه استفاده می شود. نتایج این تحقیق می‌تواند به درک بهتر خواص این ذرات و کاربردهای آن ها کمک کند.

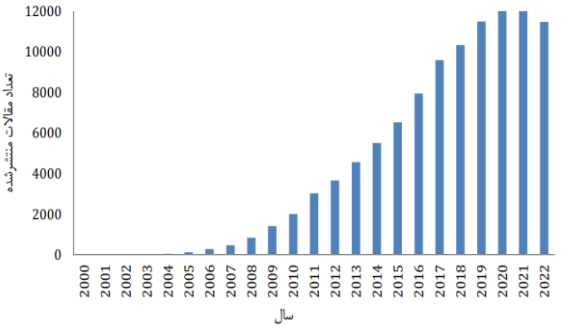
واژه‌های کلیدی: *حجم نانوذرات، قطر نانو ذرات، غلظت مولی نانو ذرات، سطح ویژه نانو ذرات*

ایمیل نویسنده مسئول: brahmati@tvu.ac.ir

تاریخ دریافت : ۱۴۰۵/۰۳/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۱

۱-مقدمه

بدون شک علم انتقال حرارت یکی از مهم ترین و پرکاربردترین علوم مهندسی است که با توجه به مساله بحران انرژی و لزوم صرفه جویی در مصرف سوخت اهمیت آن چند برابر می شود هدایت حرارتی پایین سیالات متداول همچون آب، روغن ها و . . . باعث کاهش راندمان تجهیزات حرارتی می شود [۱] بنابراین نیاز شدیدی به پیشرفت و بهبود سیالات انتقال حرارتی با ضریب هدایت حرارتی بالا احساس می شود. به طور مثال با توجه به راندمان پایین موتورهای احتراق داخلی، قسمت بسیار زیادی از انرژی شیمیایی سوخت مصرفی آن‌ها به‌صورت گرما از طریق سیستم خنک‌کاری به محیط دفع می‌شود [۲]. در صنایع خودروسازی تقاضا برای موتورهای قدرتمند در فضای کوچک تر موتور و سیستم های خنک کاری، مشکلاتی در میزان تلفات گرما در رادیاتور خودرو به وجود آورده است [۳] بنابراین ایده پراکنده سازی ذرات جامد در سیالات که با ذرات میلی و میکرومتری آغاز شده بود، با استفاده از نانو ذرات جامد تکمیل شده و امروزه نانو سیالات جایگزین مناسبی برای سیالات معمولی از قبیل آب و روغن به شمار می روند. نانو ذرات، سبب افزایش قابل توجه در انتقال حرارت نانو سیالات می شوند. خواص جالب نانوسیال ها و پتانسیل زیادی که برای افزایش انتقال حرارت از خود نشان می دهند سبب شده که این گروه از سیالات در سال های اخیر در کانون توجه محققان قرار گیرند. قرار دادن ذرات فلزی در سیال برای افزایش انتقال حرارت ایده جدیدی نیست. بطوریکه آن توسط ماکسول در سال ۱۹۰۴ ثبت شده است [۴]. نانوذرات را می توان به صورت آئروسل (جامد یا مایع در هوا)، سوسپانسیون (جامد در مایعات) یا امولسیون (مایعات در مایعات) مشاهده کرد [۵]. در شکل ۱ بر اساس اطلاعات پایگاه Wos آمار تولید مقالات ایران در خصوص نانو سیال بین سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ نشان داده شده است [۶].

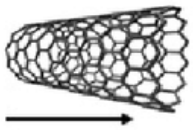
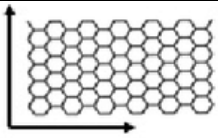
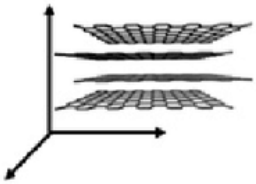


شکل ۱. آمار مقالات منتشر شده ایران در خصوص نانو سیال بر اساس اطلاعات پایگاه Web of Science (WoS) [٦]

دسته بندی نانو مواد

دسته بندی های متنوعی در نانومواد وجود دارد که مهم ترین آنها دسته بندی بر اساس ابعاد نانویی آنهاست. هر ماده در فضا دارای سه بعد طول، عرض و ارتفاع است. اگر حداقل یکی از این ابعاد تا مقیاس نانو کوچک شده باشد به آن ماده نانوساختار می گویند و بعدی که در مقیاس نانو نیست را بعد آزاد می گوییم. بطور کلی این دسته بندی صفربعدی، یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی هستند که از لحاظ کاربرد و خواص کاملا با یکدیگر متفاوت اند. لازم به ذکر است عمل تبدیل مواد یا تبدیل آنها به نانومواد تک بعدی، دوبعدی و ... را سنتز گویند.

جدول ۱. دسته بندی انواع نانو مواد [۷]

0D	1D	2D	3D
Fullerene	 Carbon Nanotube	 Graphene	 Graphite

نانو ساختار Fullerene 0D که به نانوذرات (Nano Particle) معروف اند، در همه ابعاد خود (طول، عرض، ارتفاع) به اندازه نانومتر کوچک شده اند و هیچ بعد آزادی ندارند. این نانوذرات که به شکل طبیعی یا مهندسی شده در اشکال کروی، استوانه ای، لوله ای، توخالی یا مکعبی ... وجود دارند که عمدتاً به شکل کروی هستند. همچنین این ذرات میتوانند خالص و تک جزیی و یا ترکیب شده از چند جز باشند. یکی دیگر از خصیصه های مهم نانوذرات، سنتز آسانتر آنها به نسبت سایر دسته بندی های نانوذرات است که به همین دلیل به صورت انبوه تولید میشوند [۸]. در نانو ساختار Carbon NanoTube 1D دو شکل از نانومواد وجود دارند که به آنها ساختار تک بعد میگویند. شکل اولیه آنها، موادی که دوبعد آنها اندازه نانومقیاس اند و بعد دیگر، آزاد است. و دسته بعدی به موادی که هر سه بعد در مقیاس نانو باشند اما یکی از بعدها چند مرحله بزرگتر از دو بعد دیگر باشد. به همین دلیل ساختار عمده شکل آنها به شکل استوانه است که به اسامی مختلفی مانند نانولوله، نانومیله، نانوسیم و نانو الیاف میباشند. مهمترین مصرف این نوع ساختارها در صنایع حسگرهای زیستی و شیمیایی و همچنین رسانایی بالقوه ای در صنعت الکترونیک میباشد که هدایت گر های خوبی در راستای سیم میباشند. اما این مواد به دلیل ساختاری که دارند از عمل سنتز سختی برخوردارند و به نسبت نانوذرات چندان توجیه اقتصادی ندارند اما به دلیل خواص منحصر خود در موارد خاصی استفاده و تولید میشوند [۹]. در نانو ساختار Graphene 2D دوبعد آزاد و یک بعد در مقیاس نانو هستند. همین خاصیت باعث شده که آنها در اشکالی صفحه مانند و تخت به خود فرم بگیرند. و به عنوان لایه های نازک و پوشش کاربرد داشته باشند. این نوع لایه ها که به دلیل نازک بودن خود آسیبی به ظاهر موارد استفاده کننده وارد نمیکنند در کاربرد های مختلف مانند بسته بندی و یا ایجاد لایه های پوششی مانند ضد آب و غیر کاربرد فراوانی دارند [۱۰]. در نانو ساختار Ghraphite 3D ماده در هر سه بعد آزاد است و هیچ کدام از ابعاد آن مقیاس نانو ندارد. دقت داشته باشید علت اینکه در دسته بندی نانو قرار گرفته این است که این اسم به نانومواد کامپوزیتی اطلاق میشود که با ترکیب چند اجزای مختلف که حداقل یکی از این اجزا ساختار نانویی دارند اطلاق میشود [۱۱].

اندازه گیری پارامترهای فیزیکی نانوذرات از جمله محاسبه قطر؛ حجم؛ جرم؛ غلظت مولی و سطح ویژه نانو ذرات از ویژگی های اساسی آن بوده و به صورت جامع در تحقیقات محققین مورد بحث قرار نگرفته است. فلذا در این تحقیق روش های و ابزارهایی که جهت محاسبه این موارد لازم است با توجه به منابع موجود جمع آوری و مورد بحث قرار گرفت.

اندازه گیری پارامترهای فیزیکی

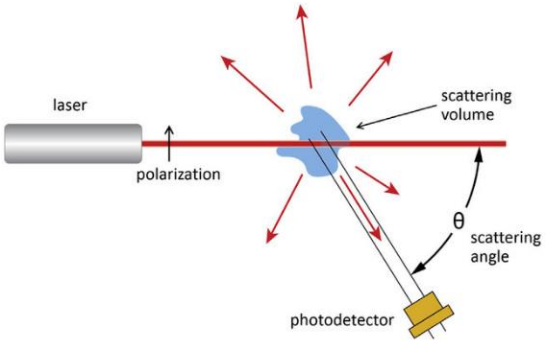
محاسبه قطر نانوذره

برای اندازه گیری قطر نانوذرات از روش های مختلفی استفاده می شود که در این تحقیق ۴ مورد از بهترین آنها یعنی روش پراکندگی استاتیک نور لیزر (SLS: Static Light Scattering)؛

روش پراکندگی نور دینامیکی (DLS: Dynamic Light Scattering)؛ روش پراش پرتو X (XDR: X-Ray Diffraction) و روش میکروسکوپی نیروی اتمی (AFM: Atomic Force Microscopy) مورد بحث قرار می گیرد.

روش SLS

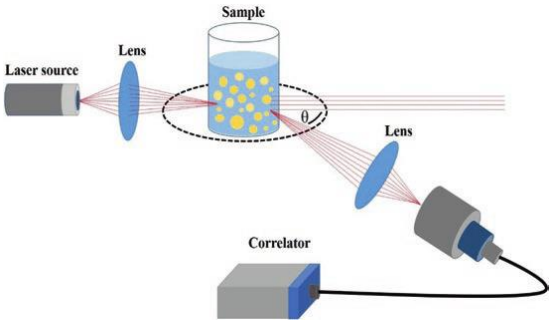
اندازه گیری ذرات با استفاده از روش پراکندگی استاتیک نور لیزر روشی بر اساس الگوی نور پراکنده شده بر روی آشکارساز است. این الگو نور پراکنده شده مجموعه ای از الگوهای پراکندگی است که توسط هر یک از ذرات ایجاد می شود. به وسیله این الگوی پراکندگی می توان اطلاعاتی از اندازه ذرات به دست آورد. شکل (۲). این روش آنالیزی روشی سریع، نسبتاً ارزان و غیر مخرب برای اندازه گیری توزیع اندازه ذرات است. این روش برای اندازه گیری ذراتی که اندازه آن ها بیش از ۱۰ میکرومتر است، کاربرد دارد [۱۲].



شکل ۲. شماتیک یک دستگاه برای اندازه گیری پراکندگی نور ساکن [۱۳].

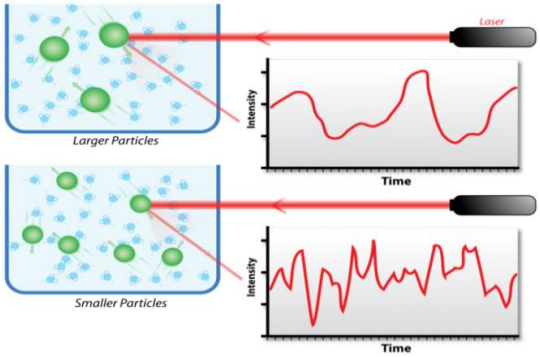
روش DLS

روش های پراکندگی نور یکی از روش های تعیین اندازه و توزیع اندازه ذرات در سیستم های کلوئیدی می باشد. در این روش مطابق شکل (۳) یک پرتو لیزر به سوسپانسیون تابانده می‌شود و پراکندگی نور لیزر توسط یک آشکارساز نوری ثبت می‌شود. ذرات با اندازه های مختلف، نور را به صورت های مختلفی پراکنده می کنند. ذرات بزرگ تر، نور را در زوایای کوچک تری پراکنده می کنند، در حالی که ذرات کوچک تر، در محدوده زوایای وسیع تری نور را پراکنده می سازند. پراکندگی نور توسط ذرات جامد باعث ایجاد یک الگو از نقاط روشن و تاریک روی آشکار ساز می‌شود. این الگوهای روشن و تاریک با حرکت ذرات تغییر می‌کنند و باعث می‌شوند که الگوی ایجاد شده با زمان تغییر کند. نرم افزار دستگاه DLS با بررسی تغییرات این الگو با زمان می‌تواند توزیع اندازه ذرات را مشخص کند [۱۴].



شکل ۳. اصول کار DLS [۱۴].

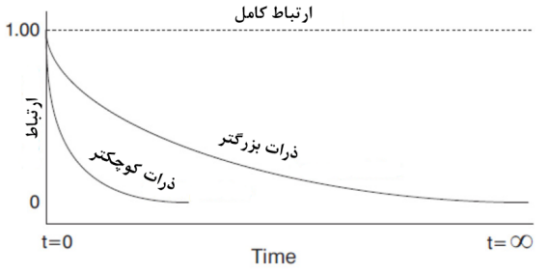
ذرات بزرگ‌تر سرعت کمتری در محلول نسبت به ذرات کوچک‌تر دارند. از این رو تغییرات الگوی پراش در سوسپانسیونی با ذرات بزرگ‌تر کندتر از سوسپانسیونی با ذرات ریزتر تغییر می‌کند. شکل (۴)



شکل ٤. شماتیکی از شدت نوسانات برای ذرات بزرگ و کوچک

در دستگاه DLS، قسمتی به نام ارتباط دهنده وجود دارد. این جزء درجه تشابه دو سیگنال را در محدوده زمانی خاصی اندازه گیری می کند. اگر شدت سیگنال بدست آمده در یک لحظه زمانیt، با شدت سیگنال حاصله در زمان کوتاه بعدی $(t+\delta t)$

مقایسه شود، تشابه و ارتباط نزدیک دو سیگنال به یکدیگر مشخص می شود. ادامه مقایسه سیگنال اولیه در زمان های بعدی نشان دهنده کاهش تابع ارتباط است. اگر اندازه گیری های تابع ارتباط در زمان های بعدی ادامه یابد، نهایتاً میزان ارتباط به صفر می رسد. سرعت حرکت ذرات، نقش مهمی در رابطه بین تابع ارتباط و اندازه ذرات دارد. اگر ذرات بزرگ اندازه گیری شوند، آنها به آهستگی حرکت کرده و شدت نور پخش شده به آهستگی نوسان می کند. حال اگر ذرات کوچک اندازه گیری شوند، آنها سریع تر حرکت می کنند و شدت نور پخش شده به سرعت نوسان می کند. شکل (۵) ارتباط بین توابع ارتباط برای ذرات بزرگ و کوچک را نشان می دهد [۱۴].



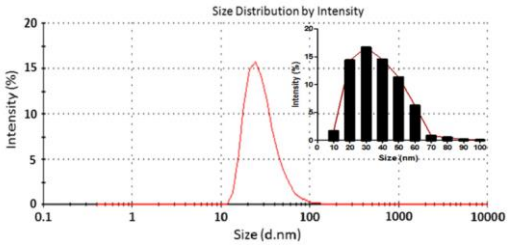
شکل ۵. منحنی توابع ارتباط برای ذرات بزرگ و کوچک

سرعت افت تابع، در مورد ذرات کوچک تر، سریع تر از ذرات بزرگ است. از اطلاعات بدست آمده از اندازه گیری تابع ارتباط، برای اندازه گیری ذرات در حالت پراکنده که به صورت ثابت و یا تصادفی هستند سبب می شوند که نور پراکنده شده به صورت تابعی از زمان نوسان کنند. از اطلاعات به دست آمده از اندازه گیری تابع ارتباط، برای اندازه گیری توزیع اندازه ذرات استفاده می شود. از اطلاعات به دست آمده از اندازه گیری تابع ارتباط، برای اندازه گیری توزیع اندازه ذرات استفاده می شود. ارتباط بین اندازه ذرات و سرعت حرکت براونی توسط رابطه استوکس انیشتین برقرار می شود:

$$d_H = \frac{KT}{3\pi\eta\, D} \qquad (۱)$$

dH: قطر هیدرودینامیکی ذره، K: ثابت بولتزمن، η: ویسکوزیته حلال است که به دما وابسته بوده و به چگالی و فشار سیستم مرتبط نیست، T: دمای مطلق وD : ضریب نفوذ است [۱۵].

نمونه ای از نمودار توزیع اندازه در شکل (۶) نشان داده شده است. در این نمودار محور X نشان دهنده توزیع اندازه ذرات، و محور Y نشان دهنده شدت نور پخش شده است.



شکل ٦. نمودار و هیستوگرام توزیع اندازه نانو ذرات طلا [١٦].

اندازه گیری قطر نانو ذرات به کمک XRD

پراش پرتو ایکس (XRD) یکی از روش‌های متداول برای بررسی ساختار بلوری و برآورد اندازه کریستالیت در مواد نانوساختار است. در این روش، الگوی پراش پرتو ایکس حاصل از نمونه بررسی شده و پهن‌شدگی پیک‌های پراش مورد تحلیل قرار می‌گیرد. کاهش اندازه کریستالیت در مقیاس نانو معمولاً موجب افزایش پهن‌شدگی پیک‌های پراش می‌شود و از این ویژگی می‌توان برای برآورد اندازه کریستالیت استفاده کرد. بااین‌حال، پهن‌شدگی پیک‌ها تنها ناشی از اثر اندازه نیست و عواملی مانند کرنش شبکه‌ای و پهن‌شدگی دستگاه نیز می‌توانند در آن سهم داشته باشند؛ ازاین‌رو، برای دستیابی به برآورد دقیق‌تر، لازم است اثر پهن‌شدگی دستگاهی و سهم اندازه و کرنش از یکدیگر تفکیک شوند. در ساده‌ترین حالت، اندازه کریستالیت را می توان از رابطه ۲ محاسبه کرد.

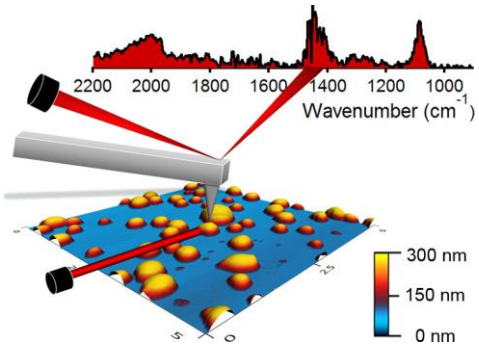
$$D = \frac{0.93\,\lambda}{B\ cs\ \theta_B} \qquad (۲)$$

در رابطه فوق D: قطر ذره، K: ضریب شکل (برای نانوذرات کروی) K=0.93، λ : طول موج اشعه ایکس، B: پهنای پیک ماکزیمم در نصف ارتفاع، θ: زاویه پراکندگی است که به ازاء آن پیک ماکزیمم شکل گرفته است [۱۷].

لازم به ذکر است که مقدار (D) حاصل از رابطه ۲، اندازه کریستالیت را نشان می‌دهد و الزاماً معادل قطر هندسی نانوذره نیست؛ زیرا یک نانوذره ممکن است از چندین کریستالیت تشکیل شده باشد. همچنین، در صورتی که اثر کرنش شبکه‌ای قابل توجه باشد، استفاده از رابطه ۲ به‌تنهایی کافی نیست. در این شرایط می‌توان از روش Williamson–Hall برای تفکیک سهم اندازه کریستالیت و کرنش شبکه‌ای استفاده کرد.

استفاده از روش AFM

میکروسکوپ نیروی اتمی ابزاری برای مشاهده ی نمونه ها با ابعاد نانومتری و بررسی توپوگرافی سطح آنهاست. به کمک میکروسکوپ AFM، می توان ویژگی های ساختاری و فیزیکی مواد نظیر زبری، سختی، اندازه ذرات و همچنین خواص مکانیکی مانند سایش یا خراش و . . . را بررسی نمود [۱۸] اصول کار این دستگاه به این صورت است که یک سوزن بسیار تیز و ظریف (در حدود ۲ میکرون و غالباً با قطر نوک کمتر از ۱۰ نانومتر) به نوک یک شی ء با قابلیت ارتجاع به نام تیرک (یا میکروکانتیلور) وصل شده و سر دیگر تیرک به یک بازوی پیزوالکتریک متصل شده است [۱۹]. از طرفی به هنگام مجاورت سوزن با سطح نمونه، نیرویی به سوزن وارد می شود که بزرگی و جهت آن وابسته به فاصله نوک سوزن از سطح و همچنین نوع سطح است. نیروی ناشی از سطح باعث خم شدن تیرک می شود و باریکه لیزر در صفحه عمود بر افق جابجا می شود. در نتیجه با آگاهی از میزان خمیدگی تیرک توسط دیودهای نوری و از طرفی معلوم بودن مکان انتهایی تیرک، موقعیت فضایی سوزن مشخص می شود. از سوی دیگر میزان خمیدگی تیرک بیانگر فاصله سوزن از سطح است که با توجه به مشخص بودن موقعیت فضایی سوزن، موقعیت فضایی سطح تعیین می شود (شکل ۷). در این میکروسکوپ نیروی بین سوزن روبشگر و سطح نمونه که باعث خم شدن کانتیلور می‌شود، توسط آشکارساز اندازه‌گیری می‌شود. این میکروسکوپ‌ها با دو حالت کاری استاتیکی(تماسی) و دینامیکی(غیر تماسی) کار می‌کنند. در حالت استاتیکی، کانتیلور در فاصله کم از سطح نمونه قرار دارد که هنگام روبش سوزن روی سطح نمونه، نیروی استاتیکی باعث خم شدن کانتیلور می‌شود. در این حالت نیروی بین کانتیلور و نمونه، نیروی دافعه است. حالت استاتیکی با دو مد کاری ارتفاع ثابت و نیرو ثابت کار می‌کند. در حالت دینامیکی، فرکانس رزونانس کانتیلور می‌تواند به عنوان معیار تغییر نیرو (یا تغییر فاصله سوزن تا نمونه) استفاده شود. در این حالت نیروی اتمی بین کانتیلور و نمونه، از نوع جاذبه است. در این حالت به علت عدم تماس با نمونه‌های نرم، تخریبی ایجاد نمی‌شود اما نسبت به حالت تماسی، سرعت روبش کمتری دارد. لازم به ذکر است که AFM روش با ارزشی برای تعیین اندازه دقیق ذرات در مقیاس نانو بوده و با استفاده از استانداردهای مناسب و آماده سازی صحیح می توان به صحت نتایج اطمینان کرد.



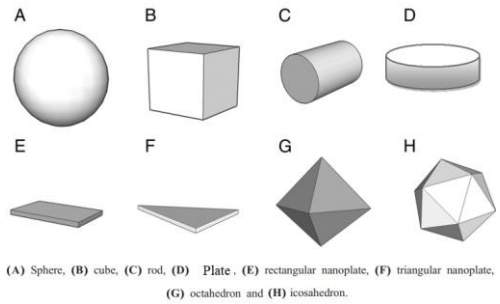
شکل ۷. اندازه گیری قطر نانوذرات با میکروسکوپ نیروی اتمی [۲۰]

خطا و عدم قطعیت

خطا و عدم قطعیت در هر یک از روش‌های اندازه‌گیری می‌تواند بر مقدار اندازه به‌دست‌آمده از نانوذرات تأثیرگذار باشد و این موضوع در تفسیر نتایج باید مورد توجه قرار گیرد. در روش SLS، عواملی مانند توزیع اندازه ذرات، شکل ذرات، تجمع ذرات، شرایط پراکندگی و نحوه تحلیل الگوی نور پراکنده‌شده می‌توانند موجب عدم قطعیت در تعیین اندازه شوند. در روش DLS، دما و ویسکوزیته محیط، غلظت نمونه، حرکت براونی، تجمع ذرات و وجود ذرات بزرگ‌تر یا آگلومره‌ها از عوامل مهم خطا هستند؛ به‌ویژه حضور تعداد کمی ذرات بزرگ می‌تواند بر شدت نور پراکنده‌شده اثر قابل توجهی داشته باشد. در روش XRD، دقت تعیین پهنای پیک، تفکیک‌پذیری دستگاه، پهن‌شدگی ناشی از ابزار، انتخاب ضریب شکل و اثر کرنش شبکه بر مقدار محاسبه‌شده تأثیر می‌گذارند. همچنین اندازه حاصل از XRD عمدتاً بیانگر اندازه بلورک است و الزاماً با اندازه هندسی کل ذره یکسان نیست. در AFM نیز شکل و اندازه نوک کانتیلور، کالیبراسیون دستگاه، زبری سطح و نحوه تثبیت ذرات می‌توانند موجب خطا، به‌خصوص در اندازه‌گیری ابعاد جانبی، شوند. در روش TEM نیز وضوح تصویر، کالیبراسیون مقیاس، آماده‌سازی نمونه، تجمع ذرات و تعداد ذرات انتخاب‌شده برای تحلیل آماری بر عدم قطعیت مؤثر هستند. بنابراین، انجام اندازه‌گیری‌های تکراری، کالیبراسیون مناسب تجهیزات، کنترل شرایط آماده‌سازی نمونه و گزارش میانگین همراه با شاخص پراکندگی می‌تواند به کاهش و ارزیابی عدم قطعیت کمک کند.

محاسبه حجم نانو ذره

اشکال مختلف نانو ذرات در شکل (۸) نشان داده شده است. از اشکال نشان داده شده در این شکل چهار مورد اول متداول می باشند که در ادامه روابطی که جهت تعیین حجم این نانو ذرات در حالت تئوری استفاده می شود در روابط (۳) الی (۶) قرار داده شده است.



(A) Sphere, (B) cube, (C) rod, (D) Plate , (E) rectangular nanoplate, (F) triangular nanoplate, (G) octahedron and (H) icosahedron.

شکل ۸. اشکال مختلف نانو ذرات [۲۱].

به ترتیب از رابطه (۳) تا (۶) به منظور اندازه گیری حجم نانو ذرات؛ کروی، میله ای، بشقابی و مکعبی استفاده شد.

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \qquad (۳)$$

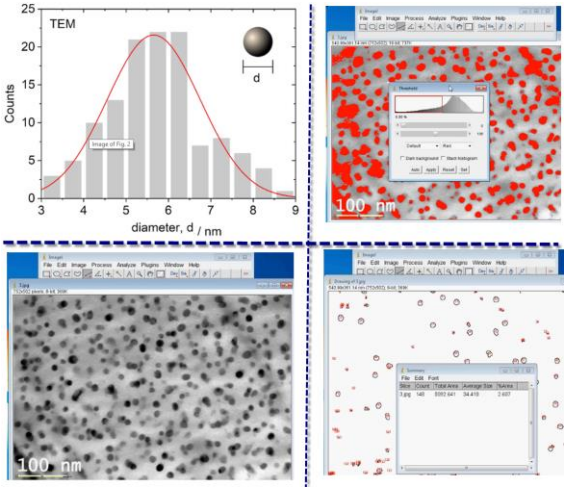
$$V = \pi r^2 \times L \qquad (۴)$$

$$V = \pi r^2 \times h \qquad (۵)$$

$$V = d^3 \qquad (۶)$$

در این روابط V حجم نانو ذرات، r شعاع میله، L طول میله، h ضخامت، d طول ضلع مکعب نانو سیال می باشد.

برای بدست آوردن این ابعاد، تصاویر گرفته شده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM: Transmission Electron Microscopy) با برنامه Imagej/Fiji مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. شکل (۹). این نرم افزار توسط موسسه ملی بهداشت آمریکا و آزمایشگاه ابزار نوری و محاسباتی دانشگاه ویسکانسین تهیه شده و یک نرم افزار جامع برای پردازش تصاویر می باشد. اندازه گیری ها در تکرارهای متفاوت انجام می شود و متوسط اندازه ها در روابط (۳) الی (۶) قرار می گیرد. لازم به ذکر است که تمامی اندازه ها توسط TEM قابل اندازه گیری نمی باشد برای نمونه در نانو پلیت ها مشکل اندازه گیری ضخامت وجود داشت که برای رفع این مشکل از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با وضوح بالا استفاده می شود [۲۲].



شکل ۹. اندازه گیری قطر نانو ذرات با نرم افزار فیجی

محاسبه جرم نانو ذره

در بسیاری از موارد چگالی نانو مواد با چگالی جسم اصلی یکسان است. و بسیاری از پژوهشگران در تحقیقات خود چگالی نانو ذرات را گزارش نموده اند در جدول شماره (۳) تعدادی از نانو ذرات مهم به همراه مقدار چگالی آنها آورده شده است.

جدول ۳. چگالی تعدادی از نانو ذرات [۲۳]

نانو ذرات	چگالی ($\rho\ (Kgm^3)$)
Copper (Cu)	8933
Copper oxide (CuO)	6320
Alumina (Al_2O_3)	3970
Titanium oxide (T_iO_2)	4250
SWCNTs	2600
MWCNTs	1600

با مشخص بودن چگالی و حجم نانو ذرات می توان از رابطه (۷) جرم نانو ذرات محاسبه شد.

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho \times V \qquad (۷)$$

محاسبه جرم نانو ذرات ترکیبی

وقتی یک نانو ذره از بیش از یک ماده ساخته می شود، باید محاسبات جداگانه ای برای تعیین جرم ذره انجام شود. به عنوان مثال، نانو پوسته های طلا از یک هسته سیلیس تشکیل شده است که توسط یک پوسته طلای نازک احاطه شده است، و جرم هسته (Core) و جرم پوسته (Shell) باید جداگانه محاسبه شود تا جرم کل ذره تعیین شود. در این حالت جرم کل ذرات از رابطه (۸) بدست می آید.

$$m_{total} = m_{core} + m_{shell} = V_{core}\rho_{core} + V_{shell}\rho_{shell} \qquad (۸)$$

با توجه به رابطه (۶) می توان برای یک ذره؛ جرم هسته کروی آن را از رابطه (۹) بدست آورد.

$$m = \rho \times V \Rightarrow m_{core} = \rho_{core} \times \frac{4}{3}\pi r^3 \qquad (۹)$$

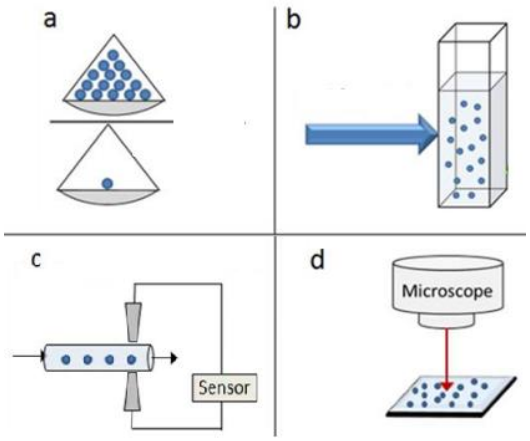
به منظور بدست آوردن جرم پوسته بهتر است جرم کل نانو ذره محاسبه شود سپس جرم هسته از آن کسر گردد. به عنوان مثال، برای نانو پوسته های طلا ابتدا قطر نانوذرات سیلیس هسته را اندازه گیری می شود و سپس قطر نهایی نانو پوسته های طلا را اندازه گیری می کنند. ضخامت نانو پوسته طلا با کم کردن شعاع کل نانو پوسته از شعاع هسته تعیین می گردد. از رابطه (۱۰) جرم پوسته محاسبه می شود.

$$m_{shell} = \frac{4}{3}\pi(r_{total}^3 - r_{core}^3)\rho_{shell} \qquad (۱۰)$$

با جایگذاری رابطه (۹) و (۱۰) در رابطه (۸) جرم کل ذره بدست آمد.

نحوه محاسبه غلظت مولی نانو ذرات

بسیاری از دانشمندان اهمیت تعیین دقیق تعداد نانوذرات یا غلظت مولی را دریافته اند. در راستای این هدف، تعدادی از روشهای تحلیلی در حال حاضر در دست توسعه است. برخی از این روش ها غلظت ها را بر اساس خصوصیات فیزیکی پراکندگی نانوذرات (به عنوان مثال، جذب نور) محاسبه می کنند، در حالی که برخی دیگر مانند میکروسکوپ و سنسورها مستقیماً ذرات منفرد را شمارش می کنند. شکل (۱۰). از آنجا که این روش ها سازوکارهای متفاوتی را در پیش می گیرند، محدودیت هایی در اندازه و ترکیبات ذرات نانو دارند. با توجه به تنوع نانوذرات موجود و سرعت تولید نانوذرات جدید، توسعه روشهای جهانی و ساده مناسب برای اندازه گیری غلظت نانوذرات در یک محدوده وسیع (به ویژه برای ذرات <۳۰ نانومتر) از اهمیت بسزایی برخوردار است.



شکل ۱۰. شماتیک روشهای اندازه گیری غلظت مولی نانوذرات (گروهی و انفرادی) [۲۴]

در شکل (10-a) وزن کل اتم ها نانو ذرات پراکنده شده با وزن یک اتم نانو ذره معادل در نظر گرفته می شود. در شکل (10-b) از طریق روش های DLS (روش های پراکندگی نور) و UV-Vis (طیف سنج مرئی فرابنفش) با توجه به شدت نور ساطع شده، می توان نسبت به اندازه گیری غلظت مولی نانوذرات در داخل یک سیال اقدام نمود. در شکل (10-c) با توجه به میدان الکتریکی ایجاد شده توسط نور پلاسما اندازه گیری انفرادی نانوذرات انجام می شود. و در نهایت در شکل (10-d) با استفاده از روش TEM (میکروسکوپ الکترونی عبوری) که می تواند در آن نمونه به صورت خشک یا در داخل سیال باشد؛ اندازه گیری نانو ذرات انجام می شود.

یکی از روش ها همان طور که در شکل (۱۰) هم اشاره شد. اندازه گیری غلظت مولی نانو ذرات بر اساس قطر ذرات اندازه گیری شده توسط TEM است. اولین قدم در تخمین غلظت مولی نانوذرات، محاسبه میانگین تعداد اتم ها در هر نانوذره است. لیو و همکاران [۲۵] رابطه (۱۱) را بین میانگین تعداد اتم های طلا (N) در هر نانو ذره و قطر نانو ذره (D) تعیین نمودند.

$$N = \frac{\pi \left(19.3 \frac{g}{cm^3}\right) D^3}{6\left(197 \frac{g}{mol}\right)} \qquad (۱۱)$$

در این رابطه $19.3 \frac{g}{cm^3}$ چگالی طلا و $197 \frac{g}{mol}$ جرم اتمی طلا می باشد. به عنوان مثال نانو ذرات سنتز شده با نسبت سیترات به اسید تتراکلورواوریک $2:1$ و $pH = 5.4$ دارای قطر فریت 21.7 nm است. برای محاسبه غلظت مولی می توان با تقسیم تعداد کل اتم های طلا (N_{Total}) معادل مقدار اسید تتراکلورواوریک اضافه شده به حجم واکنش بر حاصلضرب (میانگین تعداد اتم های طلا (N) در حجم واکنش (V) و در عدد آووگادرو) این مقدار را بدست آورد.

$$Concentration \left(\frac{mol}{L}\right) = \frac{N_{Total}}{N \times V \times N_A} \qquad (۱۲)$$

اندازه گیری سطح ویژه

سطح ویژه نانوذره عبارت است از مقداری از سطح ماده که در واحد جرم آن قرار می گیرد. واحد سطح ویژه $\frac{m^2}{Kg}$ می باشد. روش های مختلفی برای اندازه سطح ویژه پودر نانوذره وجود دارد که برخی از آنها عبارتند از جذب گاز، جذب مولکول از محلول و روش جذب متیلن آبی [۲۶].

روش جذب گاز

در این روش با توجه به حجم گاز جذب شده موجود روی سطح و تخلخل های ماده جذب کننده به شکل تک لایه یا چندلایه محاسبه می شود [۲۷] جذب تک لایه و جذب چند لایه به ترتیب با استفاده از نظریه لانگمیر و نظریه BET بیان می شوند [۲۸]. امروزه دستگاه هایی وجود دارد که با استفاده از روش BET اقدام به اندازه گیری سطح ویژه پودرها می کنند.

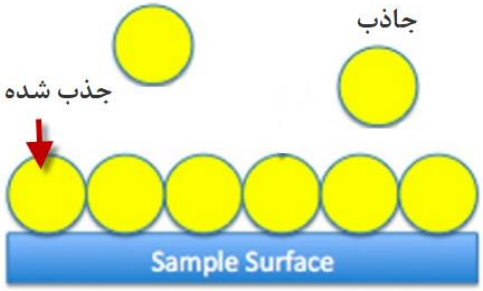
طبق نظریه لانگمیر جذب فیزیکی مولکول ها گاز به شکل تک لایه روی سطح جامد انجام می شود [۲۹]. در این نظریه فرض بر آن است که سطح جسم کاملاً یکنواخت و همگن است و تمام مکان های سطح دارای اولویت یکسان برای جذب هستند. همچنین، مولکول های گاز با یکدیگر و با سطح جاذب هیچ بر هم کنشی ندارند. برای بیان رابطه میان مکان های جذب و مولکول های گاز در نظریه لانگمیر از رابطه (۱۳) استفاده می شود.

$$A_g + S \leftrightarrow AS \qquad (۱۳)$$

در این معادله، A_g مولکول های گاز و S مکان های جذب است. رابطه خطی لانگمیر به شکل معادله (۱۴) است.

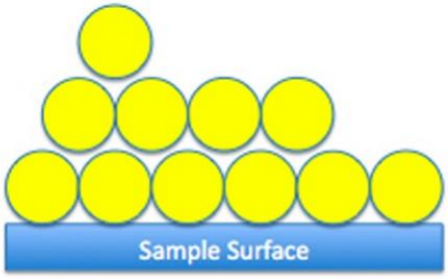
$$\frac{1}{V} = \frac{1}{KV_{mon}}\frac{1}{P} + \frac{1}{V_{mon}} \qquad (۱۴)$$

که V_{mon} حجم گاز جذب شده به شکل تک لایه در شرایط استاندارد فشار و دما، K ثابت تعادل و P فشار جزئی گاز است. بنابراین، سطح کل ماده با محاسبه تعداد مولکول های جذب شده (V_{mon}) و سطح اشغال شده به وسیله هر مولکول گاز به دست می آید.



شکل ۱۱. جذب تک لایه [۳۰]

در عمل سازوکار جذب به دلیل نایکنواخت بودن سطح جاذب و بر هم کنش مولکول های گاز با یکدیگر و سطح جاذب، به شکل تک لایه نیست و معمولاً سازوکار جذب چند لایه است. از این رو، نظریه جذب BET برای رفع نقص نظریه لانگمیر بر اساس جذب فیزیکی گاز ارائه شد [۳۱].



شکل ۱۲. جذب چند لایه [۳۰]

تعیین سطح ویژه ماده با روش BET براساس اندازه گیری حجم گاز نیتروژن جذب و واجذب شده به وسیله سطح ماده در دمای ثابت نیتروژن مایع (۷۷ درجه کلوین) است. می توان هم دمای جذب را با مقدار گاز جذب شده روی سطح در محدوده گسترده ای از فشار های نسبی و در دمای ثابت اندازه گیری کرد [۳۲].

روش جذب مولکول از محلول

در این روش، از جذب مایعات قطبی روی سطح نمونه استفاده می شود. مایعی که در این روش استفاده می شود اتیلن گلیکول مونو اتیل اتر (EGME) است [۳۳]. این روش برای نمونه هایی که در مایع قطبی حل نمی شوند و قابلیت جذب مناسبی دارند بسیار کارآمد می باشد. اساس این روش قرار

گیری EGME به شکل تک لایه ای روی سطح نمونه است و با دانستن سطحی که به وسیله یک مولکول مایع اشغال می شود، می توان سطح ویژه را محاسبه کرد [۳۴].

روش جذب متیلن آبی

یکی از بهترین روش ها برای تعیین سطح ویژه پودر، روش جذب متیلن آبی است. در این روش کافی است مقدار متیلن جذب شده توسط پودر محاسبه شود. آبی متیلن رنگ کاتیونی ($C_{16}H_{18}N_3S^+$) است که بارهای منفی سطح را جذب می کند، بنابراین بیشتر می تواند برای تعیین سطح ویژه سطوحی مناسب باشد که بار آنیونی دارند و در کل با تعیین مقدار آبی متیلن جذب شده سطح ویژه تخمین زده می شود [۳۵].

جدول ۲. مقایسه ویژگی‌ها، مزایا، محدودیت‌ها و کاربردهای روش‌های مختلف مشخصه‌یابی نانوذرات

روش	ویژگی و مبنای اندازه گیری	کاربرد اصلی	مزایا	محدودیت ها و ملاحظات
SLS	اندازه‌گیری بر اساس الگوی پراکندگی استاتیک نور توسط ذرات	تعیین اندازه و توزیع اندازه ذرات	سریع، نسبتاً ارزان و غیرمخرب	برای ذرات با اندازه بیش از حدود ۱۰ میکرومتر ذکر شده است؛ بنابراین کاربرد آن برای نانوذرات باید با محدوده اندازه و مشخصات دستگاه تطبیق داده شود.
DLS	تعیین اندازه ذرات از تغییرات زمانی شدت نور پراکنده‌شده و حرکت براونی	تعیین اندازه و توزیع اندازه نانوذرات در سوسپانسیون‌های کلوئیدی	مناسب برای اندازه‌گیری ذرات در حالت پراکنده و امکان تعیین توزیع اندازه	به شرایط پراکندگی ذرات در محیط مایع و رفتار حرکت براونی وابسته است.
XRD	تعیین اندازه از پهن‌شدگی پیک‌های پراش پرتوX	تعیین اندازه بلورک‌های مواد نانوساختار بلوری	مناسب برای نمونه‌های بلوری و قابل استفاده برای استخراج اطلاعات مرتبط با ساختار بلوری	اندازه حاصل از XRD لزوماً معادل اندازه هندسی کل ذره نیست و به شرایط پراش و پارامترهای رابطه مورد استفاده وابسته است.
AFM	اندازه‌گیری توپوگرافی سطح و ابعاد نانومتری با استفاده از نیروی بین	تعیین اندازه، شکل/توپوگرافی و زبری سطح نانوذرات	امکان بررسی مستقیم توپوگرافی سطح و ویژگی‌های فیزیکی و	آماده‌سازی صحیح نمونه و استفاده از استاندارد مناسب برای دستیابی به نتایج قابل اعتماد ضروری است.

	نوک کانتیلور و سطح		مکانیکی	
TEM	مشاهده مستقیم ذرات و استخراج ابعاد از تصاویر میکروسکوپی	تعیین اندازه، شکل و مورفولوژی نانوذرات و محاسبه حجم	امکان مشاهده مستقیم ذرات و اندازه‌گیری ابعاد؛ قابلیت تحلیل تصاویر با ImageJ/Fiji	اندازه‌گیری برخی ابعاد، مانند ضخامت نانوپلیت‌ها، با TEM با محدودیت مواجه است و ممکن است به روش مکمل نیاز باشد.
SEM	تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی	بررسی ابعاد و ساختار سطحی	مناسب به‌عنوان روش مکمل در مواردی که اندازه‌گیری برخی ابعاد با TEM دشوار است.	کاربرد آن عمدتاً در ارتباط با رفع محدودیت اندازه‌گیری ضخامت نانوپلیت‌ها می باشد.
BET	تعیین سطح ویژه بر اساس جذب و واجذب گاز، به‌ویژه نیتروژن	اندازه‌گیری سطح ویژه پودرهای نانوذره	روش متداول برای تعیین سطح ویژه و امکان بررسی رفتار جذب چندلایه	نیازمند اندازه‌گیری جذب/واجذب گاز و رعایت شرایط مناسب آزمون است.
جذب مولکولی از محلول (EGME)	تعیین سطح ویژه بر اساس جذب تک‌لایه مولکول مایع روی سطح نمونه	تعیین سطح ویژه نمونه‌های مناسب برای این روش	قابل استفاده برای نمونه‌هایی که در مایع قطبی حل نمی‌شوند و قابلیت جذب مناسبی دارند.	به قابلیت جذب نمونه و شرایط برهم‌کنش آن با EGME وابسته است.
جذب متیلن آبی	تخمین سطح ویژه بر اساس مقدار متیلن آبی جذب‌شده روی سطح	تعیین سطح ویژه پودرها، به‌خصوص سطوح دارای بار منفی	روش نسبتاً ساده برای تخمین سطح ویژه	برای سطوحی که قابلیت جذب متیلن آبی دارند مناسب‌تر است و به ویژگی بار سطح وابسته است.

نتیجه گیری

در سال های اخیر استفاده از نانوذرات در سیال های پایه به منظور افزایش خاصیت جذب انرژی و بهبود انتقال حرارت مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. افزایش انتقال حرارت امتیاز کوچک سازی تجهیزات را به همراه دارد. بنابراین نانو سیال از لحاظ اقتصادی نسبت به سیالات پایه بسیار مقرون به صرفه می باشد. این مواد با توجه به خواص منحصر به فردی که دارند در بیشتر زمینه‌ها استفاده می شوند. به همین دلیل بررسی ویژگی‌های آن‌ها حائز اهمیت است. در این تحقیق اندازه گیری پارامترهای فیزیکی نانوذرات از جمله محاسبه قطر؛ حجم؛ جرم؛ غلظت مولی و سطح ویژه نانو ذرات با توجه به منابع موجود جمع آوری و مورد بحث قرار گرفت. نتایج بررسی نشان داد برای تعیین قطر نانو ذرات از روش های SLS؛ DLS؛ XDR و AFM استفاده می شود. با تحلیل تصاویر دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) در برنامه Imagej/Fiji و به کمک روابط ارائه شده برای حجم نانو ذرات می توان حجم آنها را محاسبه کرد. از روش های جذب گاز، جذب مولکول از محلول و روش جذب متیلن آبی به منظور بررسی سطح ویژه استفاده می شود. در روش جذب گاز از نظریه لانگمیر برای جذب تک لایه و از نظریه BET برای جذب چند لایه استفاده می شود.

فهرست نمادها و نشانه ها

B: پهنای پیک ماکزیمم در نصف ارتفاع

D: قطر ذره

d: طول ضلع مکعب

dH: قطر هیدرودینامیکی ذره

h: ضخامت

K: ضریب شکل

k: ثابت بولتزمن

L: طول میله

r: شعاع میله

T: دمای مطلق

V: حجم نانو ذرات

λ : طول موج اشعه ایکس

θ: زوایه پراکندگی

η: ویسکوزیته سیال

منابع

[1] Asadi Boroojeni, B., & Khosravi Farsani, A. (2024). Numerical Simulation of Laminar Nanofluids Flow in a Curved Duct with a Square Cross-section. Karafan Journal, 21(1), 411-433 .

[2] Ghasemi Zavaragh, H. (2022). Optimization of the Cooling System of a Gasoline Internal Combustion Engine to Reduce Fuel Consumption and Exhaust Emissions. Karafan Journal, 19(1), 291-309 .

[3] Rahmatinejad, B., Abbasgholipour, M., & Mohammadi Alasti, B. (2021). Redesign of engine radiator based on number of optimal fans using a genetic algorithm. Karafan Quarterly Scientific Journal, 17(4), 99-118 .

[4] Rahmatinejad, B. (2022). Investigating thermophysical properties and thermal performance of Al2O3 nanoparticles in water and ethylene glycol based fluids. Journal of Nanostructures, 12(3), 642-659 .

[5] Sun, Y., Yang, D., Shi, L., Wu, H., Cao, Y., He, Y., & Xie, T. (2020). Properties of nanofluids and their applications in enhanced oil recovery: a comprehensive review. Energy & Fuels, 34(2), 1202-1218 .

[6] Rahmatinejad ,B., Rahimi Asiabaraki, H., Azimpour Shishevan, F., & Mohtadi Bonab, M. A. (2023). Experimental analysis of the effect of using aluminum oxide nanofluid in improving the heat transfer of XU7

[16] Singh, M., Chandrasekaran, N., Mukherjee, A., Kumar, M., & Kumaraguru, A. (2014). Cancerous cell targeting and destruction using pH stabilized amperometric bioconjugated gold nanoparticles from marine macroalgae, Padina gymnospora. Bioprocess and biosystems engineering, 37, 1859-1869 .

[17] Suramwar, N., Thakare, S., & Khaty, N. (2012). Synthesis and catalytic properties of nano CuO prepared by soft chemical method .

[18] Binnig, G., Gerber, C., Stoll, E., Albrecht, T., & Quate, C. (1987). Atomic resolution with atomic force microscope. Europhysics Letters, 3(12), 1281 .

[19] Majumdar, A., Oden, P., Carrejo, J., Nagahara, L., Graham, J & ,Alexander, J. (1992). Nanometer-scale lithography using the atomic force microscope. Applied Physics Letters, 61(19), 2293-2295 .

[20] Bondy, A. L., Kirpes, R. M., Merzel, R. L., Pratt, K. A., Banaszak Holl, M. M., & Ault, A. P. (2017). Atomic force microscopy-infrared spectroscopy of individual atmospheric aerosol particles: subdiffraction limit vibrational spectroscopy and morphological analysis. Analytical chemistry, 89(17), 8594-8598 .

[21] Jo, D. H., Kim, J. H., Lee, T. G., & Kim, J. H. (2015). Size ,surface charge, and shape determine therapeutic effects of nanoparticles on brain and retinal diseases. Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine, 11(7), 1603-1611 .

[22] Rishi, K., & Rana, N. (2015). Particle size and shape analysis using image J with customized tool for segmentation of particles. Int. J. Comput. Sci. Commun. Netw, 4, 23-28 .

[23] Sakinah, S., Azmi, W., & Alias, J. (2020). Characterization of TiO2 nanopaint for automotive application. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering ,

[24] Shang, J., & Gao, X. (2014). Nanoparticle counting: towards accurate determination of the molar concentration. Chemical Society Reviews, 43(21), 7267-7278 .

[25] Liu, X., Atwater, M., Wang, J., & Huo, Q. (2007). Extinction coefficient of gold nanoparticles with different

engine radiator. The Journal of Engine Research, 70(2), 66-79 .

[7] He, B., Feng, M., Chen, X., & Sun, J. (2021). Multidimensional (0D-3D) functional nanocarbon: Promising material to strengthen the photocatalytic activity of graphitic carbon nitride. Green Energy & Environment, 6(6), 823-845 .

[8] Singh, R. P. (2011 .(Prospects of nanobiomaterials for biosensing. International journal of electrochemistry, 2011(1), 125487 .

[9] Abreu, B., Montero, J., Buzaglo, M., Regev, O., & Marques, E. F. (2021). Comparative trends and molecular analysis on the surfactant-assisted dispersibility of 1D and 2D carbon materials: Multiwalled nanotubes vs graphene nanoplatelets. Journal of Molecular Liquids, 333, 116002 .

[10] Mohanty, R., Mishra, A., & Khatei, J. (2020). Two-dimensional nanostructures for advanced applications. In Adapting 2D Nanomaterials for Advanced Applications (pp. 1-31). ACS Publications .

[11] Das, V. K., Shifrina, Z. B., & Bronstein, L. M. (2017). Graphene and graphene-like materials in biomass conversion: paving the way to the future. Journal of Materials Chemistry A, 5(48), 25131-25143 .

[12] Kolokolnikov, I., Nepomnyashchaya, E., & Velichko, E. (2019). Static light scattering for determination of physical parameters of macro-and nanoparticles. Journal of Physics: Conference Series ,

[13] Minton, A. P. (2016 .(Recent applications of light scattering measurement in the biological and biopharmaceutical sciences. Analytical biochemistry, 501, 4-22 .

[14] Rahmati Nejad, B., Abbasgholipour, M., & Mohammadi Alasti, B. (2022). Experimental Evaluation of Heat Transfer of MF 285 Tractor Radiator, using Nano-fluid AL2O3+ Water. Journal of Agricultural Machinery, 12(3), 281-299 .

[15] Rahmatinejad, B., Abbasgholipour, M., & Alasti, B. M. (2021). Investigating thermo-physical properties and thermal performance of Al2O3 and CuO nanoparticles in Water and Ethylene Glycol based fluids. International Journal of Nano Dimension, 12(3 .(

sizes and different capping ligands. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 58(1), 3-7 .

[26] Hanaor, D. A., Ghadiri, M., Chrzanowski, W., & Gan, Y. (2014). Scalable surface area characterization by electrokinetic analysis of complex anion adsorption. Langmuir, 30(50), 15143-15152 .

[27] Santamarina, J., Klein, K., Wang, Y. H., & Prencke, E. (2002). Specific surface: determination and relevance. Canadian Geotechnical Journal, 39(1), 233-241 .

[28] Hwang, N., & Barron ,A. R. (2011). BET surface area analysis of nanoparticles. The connexions project, 1-11 .

[29] Lowell, S., & Shields, J. E. (2013). Powder surface area and porosity (Vol. 2). Springer Science & Business Media .

[30] Gregg, S. J., Sing, K. S. W., & Salzberg, H. (1967). Adsorption surface area and porosity. Journal of The electrochemical society, 114(11), 279Ca .

[31] Feller, C., Schouller, E., Thomas, F., Rouiller, J., & Herbillon, A. J. (1992). N2-BET specific surface areas of some low activity clay soils and their relationships with secondary constituents and organic matter contents. Soil Science, 153(4), 293-299 .

[32] Sing, K. S. (1995). Physisorption of nitrogen by porous materials. Journal of Porous Materials, 2, 5-8 .

[33] Bower, C., & Gschwend, F .(1952) .Ethylene glycol retention by soils as a measure of surface area and interlayer swelling. Soil Science Society of America Journal, 16(4), 342-345 .

[34] Pronk, G., Heister, K., Woche, S., Totsche, K., & Kögel-Knabner, I. (2013). The phenanthrene-sorptive interface of an arable topsoil and its particle size fractions. European journal of soil science, 64(1), 121-130 .

[35] Xue, L., Lu, B., Wu, Z.-S., Ge, C., Wang, P., Zhang, R., & Zhang, X.-D. (2014). Synthesis of mesoporous hexagonal boron nitride fibers with high surface area for efficient removal of organic pollutants. Chemical Engineering Journal, 243, 494-499 .

A review of measurement and calculation methods for the physical parameters of nanoparticles

Bahman Rahmatinejad [1]*, Farzin Azimpour Shishevan [1], Hadi Ghasemi Zavaragh [1]

[1] *Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.*

Abstract

Nanoparticles are defined as particles that are in the nanoscale range (1 to 100 nanometers). Due to their very small size, these particles possess unique physical, chemical, and biological properties that differ from those of larger dimensions. Measuring the physical parameters of nanoparticles, including calculating their diameter, volume, mass, molar concentration, and specific surface area, is fundamental. This research compiles and discusses the methods and instruments required for these calculations, based on available resources. The results of the review showed that SLS, DLS, XRD, and AFM methods are used to determine the diameter of nanoparticles. By analyzing images from a Transmission Electron Microscope (TEM) in the ImageJ/Fiji software and using the presented relationships for nanoparticle volume, their volume can be calculated. Gas adsorption, molecule adsorption from solution, and methylene blue adsorption methods are used to determine the specific surface area. The results of this research can contribute to a better understanding of the properties of these particles and their applications.

Keywords: Nanoparticle volume, Nanoparticle diameter, Nanoparticle molar concentration, Nanoparticle specific surface area

فصلنامه ISC انجمن نانو فناوری ایران

Corresponding Author. Email: brahmati@tvu.ac.ir

Received: 2026-06-05 Revised: 2026-07-10 Accepted: 2026-08-12