



جمهوری اسلامی ایران  
Islamic Republic of Iran  
سازمان ملی استاندارد ایران

Iran National Standards Organization



استاندارد ملی ایران

۲۳۲۲۰

چاپ اول

۱۴۰۲

INSO

23220

1st Edition

2023

Identical with  
ISO/TS 23302:

2021

فناوری نانو- الزامات و توصیه‌ها برای  
شناسایی اندازه‌ده‌های مشخصه‌یابی نانواشیاء  
و مواد حاوی آن‌ها

**Nanotechnologies — Requirements and  
recommendations for the identification of  
measurands that characterise nano-objects  
and materials that contain them**

ICS: 07.120

استاندارد ملی ایران شماره ۲۳۲۲۰ (چاپ اول): سال ۱۴۰۲

سازمان ملی استاندارد ایران

تهران، ضلع جنوب غربی میدان ونک، خیابان ولیعصر، پلاک ۲۵۹۲

صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۶۱۳۹ تهران - ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۱۰۳ و ۸۸۸۸۷۰۸۰

کرج، شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۳۱۵۸۵-۱۶۳ کرج - ایران

تلفن: ۸-۳۲۸۰۶۰۳۱ (۰۲۶)

دورنگار: ۳۲۸۰۸۱۱۴ (۰۲۶)

رایانامه: [standard@inso.gov.ir](mailto:standard@inso.gov.ir)

وبگاه: <http://www.inso.gov.ir>

**Iran National Standards Organization (INSO)**

No. 2592 Valiasr Ave., South western corner of Vanak Sq., Tehran, Iran

P. O. Box: 14155-6139, Tehran, Iran

Tel: + 98 (21) 88879461-5

Fax: + 98 (21) 88887080, 88887103

Standard Square, Karaj, Iran

P.O. Box: 31585-163, Karaj, Iran

Tel: + 98 (26) 32806031-8

Fax: + 98 (26) 32808114

Email: [standard@inso.gov.ir](mailto:standard@inso.gov.ir)

Website: <http://www.inso.gov.ir>

## به نام خدا

### آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

سازمان ملی استاندارد ایران به موجب بند یک ماده ۷ قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد، ابلاغ شده در دی ماه ۱۳۹۶، وظیفه تعیین، تدوین، به روز رسانی و نشر استانداردهای ملی ایران را بر عهده دارد.

تدوین استاندارد در حوزه‌های مختلف در کمیسیون‌های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب‌نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می‌شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و واردکنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان‌های دولتی و غیردولتی حاصل می‌شود. پیش‌نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی‌نفع و اعضای کمیسیون‌های مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادهای در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می‌شود.

پیش‌نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان‌های علاقه‌مند و ذی‌صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می‌کنند در کمیته ملی طرح، بررسی و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شود که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که در سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌شود به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO)<sup>۱</sup>، کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)<sup>۲</sup> و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)<sup>۳</sup> است و به عنوان تنها رابط<sup>۴</sup> کمیسیون کدکس غذایی (CAC)<sup>۵</sup> در کشور فعالیت می‌کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی‌های خاص کشور، از آخرین پیشرفت‌های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می‌تواند با رعایت موازین پیش‌بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف‌کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری کند. سازمان می‌تواند به منظور حفظ بازارهای بین‌المللی برای محصولات کشور، اجرای استانداردهای کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری کند. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و مراکز واسنجی (کالیبراسیون) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد این‌گونه سازمان‌ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می‌کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامه تأیید صلاحیت به آن‌ها اعطا و بر عملکرد آن‌ها نظارت می‌کند. ترویج دستگاه بین‌المللی یکاها، واسنجی وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization

2- International Electrotechnical Commission

3- International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legals)

4- Contact point

5- Codex Alimentarius Commission

## کمیسیون فنی تدوین استاندارد

### «فناوری نانو- الزامات و توصیه‌ها برای شناسایی اندازه‌ده‌های مشخصه‌یابی نانوشیاء و مواد حاوی آن‌ها»

#### رئیس:

صادق حسنی، صدیقه  
(دکتری شیمی تجزیه-الکتروشیمی)

#### سمت و/یا محل اشتغال:

مدیر تحقیق و توسعه- شرکت آرال تجهیز آزما

#### دبیر:

اسدیان، الهام  
(دکتری علوم و فناوری نانو)

عضو هیئت علمی- دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی- دانشکده  
فناوری‌های نوین پزشکی

#### اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

اژه‌ای، فائزه  
(دکتری علوم و فناوری نانو)

عضو مستقل

اسلامی‌پور، الهه  
(کارشناسی ارشد زیست‌شناسی)

کارشناس مسئول- گروه استاندارد و ایمنی ستاد فناوری نانو

باوی، امید  
(دکتری علوم و فناوری نانو)

عضو هیئت علمی- دانشگاه صنعتی شیراز- دانشکده مهندسی  
مکانیک

سهرابی جهرمی، ابوذر  
(دکتری فناوری نانو)

مدیر عامل- شرکت راصد توسعه فناوری‌های پیشرفته

سیفی، مهوش  
(کارشناسی ارشد مدیریت دولتی)

مشاور- گروه استاندارد و ایمنی ارزیابی محصولات ستاد ویژه  
توسعه فناوری نانو

شاهوی، محمدحسن  
(دکتری مهندسی شیمی)

عضو هیئت علمی- دانشگاه تخصصی فناوری‌های نوین آمل

گل‌زردی، سمیرا  
(کارشناسی ارشد مهندسی مواد)

کارشناس مسئول- گروه ارزیابی و نظارت محصولات ستاد فناوری  
نانو

منتظری، مانی  
(کارشناسی ارشد مهندسی مواد)

مدیر عامل شرکت نوین فن سنجش آویسا

**اعضا:** (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

میرسپاه، علی

(کارشناسی ارشد فیزیک)

ناصری، آمنه

(دکتری علوم و فناوری نانو)

**ویراستار:**

سیفی، مهوش

(کارشناسی ارشد مدیریت دولتی)

**سمت و/یا محل اشتغال:**

عضو مستقل

عضو هیئت علمی - پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی - سازمان

تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

مشاور - گروه استاندارد و ایمنی محصولات ستاد ویژه توسعه

فناوری نانو

## فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
ط	پیش‌گفتار
ی	مقدمه
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۱	۲ مراجع الزامی
۱	۳ اصطلاحات و تعاریف
۲	۳-۱ اصطلاحات اصلی عمومی
۴	۳-۲ اصطلاحات مرتبط با اندازه‌دهه‌ها
۹	۴ کوتاه‌نوشت‌ها
۱۲	۵ رویکردهایی برای تعیین اندازه‌دهه‌ها با هدف مشخصه‌یابی نانواشیاء و انبوهه‌ها و کلوخه‌های آنها و مواد حاوی نانواشیاء
۱۲	۵-۱ روش اجرایی
۱۳	۵-۲ انواع اندازه‌دهه‌ها
۱۳	۵-۳ حالت نانواشیاء
۱۴	۶ اندازه‌دهه‌های مربوط به اندازه‌گیری اندازه و شکل نانواشیاء و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آنها
۱۴	۶-۱ کلیات
۱۵	۶-۲ اندازه‌دهه‌های مربوط به اندازه‌گیری اندازه و شکل
۱۶	۶-۳ اندازه‌دهه‌های مربوط به اندازه‌گیری اندازه و شکل در هواسل‌ها
۲۴	۶-۴ اندازه‌دهه‌های مربوط به اندازه‌گیری اندازه و شکل در پودرها
۲۹	۶-۵ اندازه‌دهه‌های مربوط به اندازه‌گیری اندازه و شکل نانواشیاء در پراکنه‌های مایع
۳۷	۶-۶ اندازه‌دهه‌های مربوط به اندازه‌گیری اندازه و شکل روی سطح (روش‌های میکروسکوپی)
۳۹	۷ اندازه‌دهه‌های مربوط به آنالیز شیمیایی نانواشیاء و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آنها
۳۹	۷-۱ کلیات
۴۰	۷-۲ اندازه‌دهه‌های مربوط به آنالیز شیمیایی سطح نانواشیاء و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آنها
۴۸	۷-۳ اندازه‌دهه‌های مربوط به آنالیز شیمیایی نانواشیاء به شکل نمونه‌های توده
۵۳	۸ اندازه‌دهه‌های مربوط به جرم و چگالی
۵۳	۸-۱ کلیات
۵۳	۸-۲ هواسل‌ها
۵۵	۸-۳ پودرها
۵۶	۸-۴ پراکنه‌های مایع
۵۸	۹ اندازه‌دهه‌های مربوط به بار - پراکنه‌های مایع

صفحه	عنوان
۵۸	۹-۱ اندازه‌دهها
۵۸	۹-۲ استانداردهای مرتبط
۵۹	۹-۳ پراکندگی نوری الکتروکوچی
۵۹	۹-۴ اندازه‌گیری پدیده‌های الکتروصوتی
۵۹	۱۰- اندازه‌دههای مربوط به بلورینگی
۵۹	۱۰-۱ اندازه‌دهها
۶۱	۱۰-۲ پراکندگی پرتو ایکس زاویه کوچک/ زاویه بزرگ
۶۲	۱۰-۳ پراش پرتو ایکس
۶۲	۱۰-۴ میکروسکوپی الکترونی عبوری با تفکیک‌پذیری بالا
۶۲	۱۰-۵ پراش الکترون برگشتی
۶۳	۱۰-۶ پراش نوترونی
۶۳	۱۰-۷ پراش الکترون بازتابی با انرژی بالا و انرژی پایین
۶۳	۱۰-۸ گرماسنجی روبشی تفاضلی
۶۴	۱۰-۹ استانداردهای مرتبط
۶۴	۱۰-۱۰ بلورنگاری تشدید مغناطیسی هسته حالت جامد
۶۴	۱۰-۱۱ بلورنگاری رامان
۶۴	۱۰-۱۲ استانداردهای مرتبط
۶۵	۱۱- اندازه‌دههای خواص نوری
۶۵	۱۱-۱ کلیات
۶۵	۱۱-۲ اندازه‌دهها
۶۵	۱۱-۳ روش‌های طیف‌سنجی
۶۶	۱۱-۴ استانداردهای مرتبط
۶۷	۱۲- اندازه‌دههای الکتریکی و الکترونیکی
۶۷	۱۲-۱ اندازه‌دهها
۶۹	۱۲-۲ روش‌ها
۷۱	۱۳- اندازه‌دههای مغناطیسی
۷۱	۱۳-۱ کلیات
۷۲	۱۳-۲ اندازه‌دهها
۷۳	۱۳-۳ روش‌ها
۷۶	۱۴- اندازه‌دههای گرمایی
۷۶	۱۴-۱ اندازه‌دهها
۷۷	۱۴-۲ روش‌ها
۷۷	۱۴-۳ استانداردهای مرتبط
۷۷	۱۵- سایر اندازه‌دههای مربوط به عملکرد

صفحه	عنوان
۷۷	۱-۱۵ کلیات
۷۸	۲-۱۵ پودرها- گرد و غبار
۷۹	۳-۱۵ پراکنه‌های مایع
۸۴	۴-۱۵ خواص مکانیکی
۸۹	کتابنامه



## پیش‌گفتار

استاندارد «فناوری نانو- الزامات و توصیه‌ها برای شناسایی اندازه‌دهی مشخصه‌یابی نانو اشیاء و مواد حاوی آن‌ها» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط بر مبنای پذیرش استانداردهای بین‌المللی/منطقه‌ای به عنوان استاندارد ملی ایران به روش اشاره شده در مورد الف، بند ۷، استاندارد ملی ایران شماره ۵ تهیه و تدوین شده، در یکصد و بیست و هشتمین اجلاس کمیته ملی استاندارد فناوری نانو مورخ ۱۴۰۲/۴/۱۸ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک ماده ۷ قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد، ابلاغ شده در دی ماه ۱۳۹۶، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران بر اساس استاندارد ملی ایران شماره ۵ (استانداردهای ملی ایران- ساختار و شیوه نگارش) تدوین می‌شوند. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در صورت لزوم تجدیدنظر خواهند شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح یا تکمیل این استانداردها ارائه شود، در هنگام تجدیدنظر در کمیسیون فنی مربوط، مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی ایران استفاده کرد.

این استاندارد ملی بر مبنای پذیرش استاندارد بین‌المللی زیر به روش «معادل یکسان» تهیه و تدوین شده و شامل ترجمه تخصصی کامل متن آن به زبان فارسی می‌باشد و معادل یکسان استاندارد بین‌المللی مزبور است:

ISO/TS 23302:2021, Nanotechnologies — Requirements and recommendations for the identification of measurands that characterise nano-objects and materials that contain them

## مقدمه

واژه «نانوشیء» برای موادی که در یک، دو یا سه بعد بیرونی دارای مقیاس نانو (در گستره تقریباً ۱ nm تا ۱۰۰ nm) هستند، به کار می‌رود. خواص ویژه وابسته به اندازه معمولاً در این گستره اندازه نمایان می‌شوند، حتی اگر بطور ناگهانی در بالاتر از این گستره از بین نروند. نانواشیاء، چه طبیعی باشند و چه ساخته شده، می‌توانند به شکل نانوصفحات (یک بعد در گستره نانو)، نانوالیاف (دارای دو بعد یا قطر در گستره نانو) و نانوذرات (سه بعد در گستره نانو) یافت شوند. نانواشیاء مساحت‌های سطح ویژه بیشتری نسبت به اشیای بزرگتر از خود نشان می‌دهند. آنها به دلیل برهمکنش‌های جاذبه در طول چرخه عمر خود، به ویژه مستعد پدیده‌های انبوهگی و کلوخگی هستند.

استفاده از نانواشیاء در تحقیق و توسعه، صنعت و کاربردهای تجاری رو به افزایش است. مشخصه‌یابی نانواشیاء و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آنها (NOAAs)<sup>۱</sup> نقش اساسی در تحقیقات پایه و کاربردی، از طریق کنترل کیفیت فرآیند و محصول و تجاری‌سازی برای حفاظت از محیط زیست و سلامت، دارد. مشخصه‌یابی نانواشیاء برای تعیین خواص فیزیکی و شیمیایی، عملکرد و طول عمر آنها کلیدی است. غالباً روش‌های دسترس‌پذیر برای مشخصه‌یابی مواد در مقیاس بزرگتر، گاهی اوقات به دلیل محدودیت‌های سامانه‌های آزمون (مانند حساسیت کم، وضوح ناکافی تجهیزات)، برای نانواشیاء به‌سختی اعمال می‌شوند. این امر منجر به توسعه روش‌های جدید و انطباق روش‌های موجود شده‌است.

انتخاب روش اغلب به‌شدت تحت‌تأثیر هزینه اولیه و در دسترس بودن، زمان و سازگاری نمونه است. هرچند، جنبه‌ای که به‌راحتی فراموش می‌شود این‌است که آیا روش انتخاب‌شده واقعاً خاصیت فیزیکی یا شیمیایی ماده‌ای را که برای اندازه‌گیری در نظر گرفته شده («اندازه‌ده»)<sup>۲</sup>، هدف قرار می‌دهد. این موضوع ممکن است بدیهی به نظر برسد، اما در عمل، دانش یا توجه ناکافی در مورد اساس واقعی اندازه‌گیری و/یا خاصیت اندازه‌گیری شده می‌تواند مانع از ارزیابی صحیح نتایج اندازه‌گیری شود.

فنون و روش‌های اندازه‌گیری معمولاً براساس خواص ماده‌ای که می‌توانند اندازه‌گیری کنند، طبقه‌بندی می‌شوند. یکی از تعریف‌های «اندازه‌ده» که در بسیاری از استانداردهای ISO استفاده می‌شود، «کمیت موردنظر برای اندازه‌گیری» است. در فناوری نانو، خواص رایج مواد که معمولاً به عنوان «اندازه‌ده موردنظر» در نظر گرفته می‌شوند، می‌تواند اندازه، شکل، ترکیب شیمیایی و بار سطح باشد. با این حال، در واقعیت، به دلیل اصول زیربنایی متفاوت اندازه‌گیری فیزیکی، نتایج به‌دست‌آمده از فنون مختلف، برای یک خاصیت رایج ماده، می‌تواند به‌طور قابل توجهی متفاوت باشد. دلیل منطقی این امر آن است که روش‌های مختلف، اندازه‌ده موردنظر را اندازه‌گیری نمی‌کند، بلکه اندازه‌ده‌های متفاوتی را اندازه‌گیری می‌کنند که مختص روش بوده اما ارتباط نزدیکی با اندازه‌ده موردنظر دارند.

1- Nano-objects, and their agglomerates and aggregates  
2- Measurand

برای استفاده موردنظر در سامانه‌های زیست‌شناختی و اهداف درمانی، ممکن است مشخصه‌یابی اضافی فراتر از مواردی که در این استاندارد ذکر شده‌است نیاز باشد.

این استاندارد اندازه‌دهه‌هایی را که برای مشخصه‌یابی نانواشیاء و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آنها استفاده شده‌است، توصیف می‌کند. استاندارد به ۱۰ بند اصلی زیر تقسیم می‌شود:

- بند ۶: اندازه‌دهه‌های اندازه و شکل؛
- بند ۷: اندازه‌دهه‌های آنالیز شیمیایی؛
- بند ۸: جرم و چگالی؛
- بند ۹: اندازه‌دهه‌های بار؛
- بند ۱۰: اندازه‌دهه‌های بلورینگی؛
- بند ۱۱: اندازه‌دهه‌های خواص نوری؛
- بند ۱۲: اندازه‌دهه‌های الکتریکی و الکترونیکی؛
- بند ۱۳: اندازه‌دهه‌های مغناطیسی؛
- بند ۱۴: اندازه‌دهه‌های گرمایی؛
- بند ۱۵: سایر اندازه‌دهه‌های مربوط به عملکرد.

## فناوری نانو- الزامات و توصیه‌ها برای شناسایی اندازه‌دهی مشخصه‌یابی نانواشیاء و مواد حاوی آن‌ها

### ۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تعیین الزامات و ارائه توصیه‌هایی برای شناسایی اندازه‌دهی به‌منظور مشخصه‌یابی نانواشیاء و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آن‌ها و ارزیابی خواص ویژه مرتبط با عملکرد مواد حاوی آن‌ها است. این استاندارد توصیه‌هایی برای اندازه‌گیری‌های مرتبط ارائه می‌دهد.

### ۲ مراجع الزامی

در مراجع زیر ضوابطی وجود دارد که در متن این استاندارد به‌صورت الزامی به آنها ارجاع داده شده‌است. بدین ترتیب، آن ضوابط جزئی از این استاندارد محسوب می‌شوند.

در صورتی که به مرجعی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدیدنظرهای بعدی آن برای این استاندارد الزام‌آور نیست. در مورد مرجعی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدیدنظر و اصلاحیه‌های بعدی برای این استاندارد الزام‌آور است.

استفاده از مراجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است:

۱-۲ استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۵، فناوری نانو- واژه‌نامه- قسمت ۱: اصطلاحات اصلی

۲-۲ استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۲-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۵، فناوری نانو- واژه‌نامه- قسمت ۲: نانواشیاء

۳-۲ استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۶-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱، فناوری نانو- واژه‌نامه- قسمت ۶: مشخصه‌یابی نانوشیء

2-4 ISO 20579-4, Surface chemical analysis — Guidelines to sample handling, preparation and mounting — Part 4: Reporting information related to the history, preparation, handling and mounting of nano-objects prior to surface analysis

### ۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد، علاوه بر اصطلاحات و تعاریف ارائه‌شده در استانداردهای ملی ایران- ایزو شماره‌های ۱-۸۰۰۰۴، ۲-۸۰۰۰۴ و ۶-۸۰۰۰۴، اصطلاحات با تعریف زیر به کار می‌رود<sup>۱</sup>:

۱ - اصطلاحات و تعاریف به‌کاررفته در این استاندارد در وبگاه‌های [www.iso.org/obp](http://www.iso.org/obp) و [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org) قابل‌دسترسی است.

### ۱-۳ اصطلاحات اصلی عمومی

۱-۱-۳

#### نانومقیاس

#### nanoscale

گستره اندازه تقریباً بین ۱ nm تا ۱۰۰ nm است.

یادآوری - خواصی را که از اندازه‌های بزرگتر، برون‌یابی نمی‌شوند غالباً در این گستره اندازه نشان داده می‌شوند.

[منبع: زیربند ۱-۲، استاندارد ملی ایران - ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۵]

۲-۱-۳

#### نانوشیء

#### nano-object

هر قطعه مجزا از یک ماده با یک، دو و یا سه بعد خارجی نانومقیاس (۱-۱-۳) است.

یادآوری - ابعاد خارجی دوم و سوم عمود بر بعد اول و همچنین عمود بر یکدیگر هستند.

[منبع: زیربند ۲-۵، استاندارد ملی ایران - ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۵]

۳-۱-۳

#### کلوخه

#### agglomerate

مجموعه‌ای از ذرات (۳-۱-۵) یا /انبوهه‌ها (۳-۱-۴) یا مخلوطی از هر دو آنها که به‌شکلی ضعیف به یکدیگر متصل شده‌اند، به‌طوری که مساحت سطح خارجی حاصل آن‌ها، مشابه مجموع مساحت سطوح تک‌تک اجزاء تشکیل‌دهنده باشد.

یادآوری ۱- نیروهایی که کلوخه را نزدیک به یکدیگر نگه‌می‌دارد، نیروهای ضعیفی مانند نیروهای وان‌دروالس و یا درهم‌تافتگی‌های فیزیکی ساده هستند.

یادآوری ۲- کلوخه‌ها به‌عنوان ذرات ثانویه نیز در نظر گرفته می‌شوند و ذرات اصلی منشاء، ذرات /اولیه (۳-۱-۶) نامیده می‌شوند.

[منبع: زیربند ۳-۱۰، استاندارد ملی ایران - ایزو شماره ۶-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

۴-۱-۳

#### انبوهه

#### aggregate

ذره (۳-۱-۵) متشکل از ذراتی با پیوندهای قوی یا جوش خورده که مساحت سطح خارجی حاصل آنها به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از مجموع مساحت سطوح تک تک اجزاء تشکیل دهنده باشد.

یادآوری ۱- نیروهایی که یک انبوهه را کنار یکدیگر نگه می‌دارد نیروهای قوی هستند، مانند پیوندهای کووالانسی و یا نتیجه جوش خوردن و گره خوردگی فیزیکی پیچیده هستند.

یادآوری ۲- انبوهه‌ها به عنوان ذرات ثانویه نیز در نظر گرفته می‌شوند و ذرات اصلی منشاء، ذرات / اولیه (۳-۱-۶) نامیده می‌شوند.

[منبع: زیربند ۳-۱۱، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۶-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

### ۵-۱-۳

#### ذره

#### particle

تکه کوچکی از ماده با مرزهای فیزیکی معین است.

یادآوری ۱- مرز فیزیکی را می‌توان به عنوان فصل مشترک نیز توصیف کرد.

یادآوری ۲- ذره می‌تواند به عنوان یک واحد جابه‌جا شود.

یادآوری ۳- این تعریف کلی از ذره برای *نانوشیاء* (۳-۱-۲) به کار می‌رود.

[منبع: زیربند 1.1، استاندارد ISO 26824: 2013]

### ۶-۱-۳

#### ذره اولیه

#### primary particle

ذره اصلی منشاء (۳-۱-۵) *کلوخه‌ها* (۳-۱-۳) یا *انبوهه‌ها* (۳-۱-۴) یا مخلوطی از هر دو است.

یادآوری ۱- ذرات تشکیل دهنده کلوخه‌ها یا انبوهه‌ها در یک حالت واقعی خاص ممکن است ذرات اولیه باشند، اما غالباً انبوهه‌ها اجزاء تشکیل دهنده هستند.

یادآوری ۲- کلوخه‌ها و انبوهه‌ها ذرات ثانویه نیز نامیده می‌شوند.

[منبع: زیربند 1.4، استاندارد ISO 26824: 2013]

### ۷-۱-۳

#### ذره سازنده

#### constituent particle

جزء قابل تشخیص و یکپارچه از یک ذره (۳-۱-۵) بزرگتر است.

یادآوری- جزء سازنده ممکن است ذره / اولیه (۳-۱-۶) یا ذره ثانویه باشد.

[منبع: زیربند ۳-۳، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۲-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۵]

### ۲-۳ اصطلاحات مرتبط با اندازه‌دهیها

۱-۲-۳

اندازه‌دهی

#### measurand

کمیتی که اندازه‌گیری آن مدنظر است.

**یادآوری ۱-** تعیین مشخصات یک اندازه‌دهی مستلزم آگاهی از نوع کمیت، توصیف حالت پدیده، جسم یا ماده حامل کمیت شامل هر جزء مرتبط و اجزای شیمیایی درگیر می‌باشد.

**یادآوری ۲-** در ویرایش دوم VIM و در IEC 60050-300: 2001، اندازه‌دهی به‌عنوان «کمیت خاص مورد اندازه‌گیری» تعریف شده‌است.

**یادآوری ۳-** اندازه‌گیری، شامل سامانه اندازه‌گیری و شرایطی که اندازه‌گیری تحت آن انجام می‌گیرد، ممکن است پدیده، جسم، یا ماده را طوری تغییر دهد که کمیت مورد اندازه‌گیری با اندازه‌دهی تعریف شده متفاوت باشد. در این مورد، اصلاح کافی لازم است.

**مثال ۱-** اختلاف پتانسیل بین پایانه‌های یک باتری ممکن است در هنگام استفاده از ولت‌متر با رسانایی داخلی قابل توجه برای انجام اندازه‌گیری، کاهش یابد. اختلاف پتانسیل مدار-باز می‌تواند از مقاومت‌های داخلی باتری و ولت‌متر محاسبه شود.

**مثال ۲-** طول یک میله فولادی در تعادل با دمای سلسیوس محیطی  $23^{\circ}\text{C}$  متفاوت از طول آن در دمای معین  $20^{\circ}\text{C}$  که اندازه‌دهی موردنظر است، خواهد بود. در این مورد، اصلاح لازم است.

**یادآوری ۴-** در شیمی، «سنجیدنی»<sup>۱</sup>، یا نام یک ماده یا ترکیب، اصطلاحاتی هستند که گاهی اوقات برای «اندازه‌دهی» استفاده قرار می‌گیرند. این به‌کارگیری اشتباه است زیرا این اصطلاحات به کمیت‌ها اشاره نمی‌کنند.

[منبع: زیربند ۳-۳، استاندارد ملی ایران شماره ۴۷۲۳: سال ۱۳۹۰]

۲-۲-۳

اندازه ذره

#### particle size

بعد خطی یک ذره (۳-۱-۵) که با یک روش اندازه‌گیری مشخص و تحت شرایط اندازه‌گیری ویژه، تعیین می‌شود.

**یادآوری-** روش‌های مختلف آنالیز بر پایه اندازه‌گیری خواص مختلف فیزیکی هستند. مستقل از خاصیت ذره که واقعا اندازه‌گیری شده است، اندازه ذره می‌تواند به‌عنوان یک بعد خطی، برای مثال به‌عنوان قطر کروی معادل، گزارش شود.

[منبع: زیربند 1.5، استاندارد ISO 26824: 2013]

۳-۲-۳

توزیع اندازه ذره

### particle size distribution

توزیع کمیت ذرات (۳-۱-۵) به صورت تابعی از اندازه ذرات (۳-۲-۲) است.

یادآوری ۱- توزیع اندازه ذره را می توان به صورت توزیع انباشتی و یا چگالی توزیع (توزیع کسر حجمی ماده در رده اندازه های متفاوت تقسیم بر پهنای همان رده) بیان شود.

یادآوری ۲- به عنوان مثال کمیت می تواند براساس عدد، جرم یا حجم باشد.

[منبع: زیربند ۴-۱-۲، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۶-۴-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

۴-۲-۳

شکل ذره

### particle shape

حالت هندسی بیرونی یک ذره (۳-۱-۵) است.

[منبع: زیربند ۴-۱-۳، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۶-۴-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

۵-۲-۳

نسبت منطری

### aspect ratio

نسبت طول یک ذره (۳-۱-۵) به عرض آن است.

[منبع: زیربند ۴-۱-۴، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۶-۴-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

۶-۲-۳

قطر معادل

### equivalent diameter

قطر کره ای است که با یک روش اندازه گیری معین اندازه ذره، پاسخی معادل با پاسخ ایجاد شده به وسیله ذره (۳-۱-۵) اندازه گیری شده دارد.

یادآوری ۱- برای مثال، خواص فیزیکی، سرعت ته نشینی یکسان یا جابه جایی حجمی محلول الکترولیت یا ناحیه قابل مشاهده در زیر میکروسکوپ هستند. خاصیت فیزیکی که به قطر معادل اشاره دارد، با استفاده از یک پایین نویس مناسب بیان می شود. [به استاندارد ملی ایران شماره ۱-۸۲۰۱: سال ۱۳۸۴ مراجعه شود]. به عنوان مثال، پایین نویس "V" برای قطر حجمی معادل و پایین نویس "S" برای قطر مساحت سطح معادل استفاده می شود.

یادآوری ۲- برای شمارش گسسته ذرات، دستگاه های پراکندگی نور، از یک قطر نوری معادل استفاده می شود.



**یادآوری ۳-** سایر پارامترهای ماده به‌عنوان مثال چگالی موثر ذرات در یک سیال نیز برای محاسبه قطر معادل مانند قطر استوکس یا قطر معادل ته‌نشینی، استفاده می‌شوند. توصیه می‌شود پارامترهایی که برای محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرند، نیز گزارش شود.

**یادآوری ۴-** برای دستگاه‌های لخت، قطر *آئرودینامیک* (۳-۲-۹) استفاده می‌شود. قطر *آئرودینامیک*، قطر کره‌ای با چگالی  $1000 \text{ kgm}^{-3}$  است که سرعت ته‌نشینی معادل با آن ذره مورد مطالعه را دارد.  
[منبع: زیربند ۴-۱-۵، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۶-۴-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

۷-۲-۳

### پراکندگی نور

#### light scattering

تغییر در انتشار نور در فصل مشترک دو محیط با خواص نوری متفاوت است.  
[منبع: زیربند ۴-۲-۵، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۶-۴-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

۸-۲-۳

### قطر هیدرودینامیکی

#### hydrodynamic diameter

*قطر معادل* (۳-۲-۶) یک ذره (۳-۱-۵) در یک مایع دارای ضریب نفوذ یکسان به‌عنوان یک ذره کروی بدون لایه مرزی در آن مایع است.

**یادآوری ۱-** در عمل، نانوذرات در محلول می‌توانند غیرکروی، پویا و حل‌شده باشند.

**یادآوری ۲-** یک ذره در یک مایع یک لایه مرزی خواهد داشت. این یک لایه نازک از سیال یا مواد جذب‌شده نزدیک به سطح جامد است که در آن تنش‌های برشی تاثیر قابل‌توجهی بر توزیع سرعت سیال تأثیر می‌گذارند. سرعت سیال از صفر در سطح جامد تا سرعت جریان آزاد در فاصله مشخصی از سطح جامد، تغییر می‌کند.

[منبع: زیربند ۴-۲-۶، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۶-۴-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

۹-۲-۳

### قطر آئرودینامیکی

#### aerodynamic diameter

قطر کره‌ای با چگالی  $1 \text{ g/cm}^3$  با همان سرعت نهایی ناشی از نیروی گرانشی در هوای آرام ذره (۳-۱-۵)، تحت شرایط غالب دما، فشار و رطوبت نسبی است.

**یادآوری -** برگرفته از زیربند 2.2، استاندارد ISO 7708: 1995

[منبع: زیربند ۳-۱-۱، استاندارد ملی ایران شماره ۲۳۲۱۰: سال ۱۳۹۱]

۱۰-۲-۳

### قطر تحرک پذیری

#### mobility diameter

قطر تحرک پذیری ذره

**particle mobility diameter**

قطر معادل تحرک پذیری ذره

**particle mobility equivalent diameter**

قطر معادل تحرک پذیری

**mobility equivalent diameter**

قطر کره‌ای حامل بار پایه اولیه با سرعت رانش یکسان ذره (۳-۱-۵) در میدان الکتریکی تحت شرایط غالب دما و فشار است.

یادآوری - قطر تحرک‌پذیری یک ذره به اندازه، شکل و میزان بار الکتریکی آن (که به فرایند باردار شدن شامل ظرفیت الکتریکی آن، یعنی ظرفیت آن برای باردار شدن الکتریکی با یون‌های دوقطبی هوا بستگی دارد) وابسته است، اما به چگالی آن بستگی ندارد.

[منبع: استاندارد 2018: EN 16966]

۱۱-۲-۳

مساحت سطح ویژه جرمی

**mass specific surface area**

مساحت سطح کل نمونه تقسیم بر جرم آن است.

یادآوری - مساحت سطح ویژه جرمی، یکای  $m^2/kg$  دارد.

[منبع: زیربند ۴-۶-۱، استاندارد ملی ایران - ایزو شماره ۶-۴-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

۱۲-۲-۳

فوتولومینسانس (نوردرخشایی)

**photoluminescence**

درخشایی ناشی از جذب تابش نوری است.

[منبع: زیربند ۵-۳، استاندارد ملی ایران - ایزو شماره ۶-۴-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

۱۳-۲-۳

اثر رامان

**Raman effect**

تابش نشریافته همراه با مولکول‌های روشن‌شده با تابش تک‌فام که با یک کاهش یا افزایش انرژی ناشی از برانگیختگی چرخشی یا ارتعاشی، مشخصه‌یابی می‌شود.

[منبع: زیربند ۵-۹، استاندارد ملی ایران - ایزو شماره ۶-۴-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

۱۴-۲-۳ پارامترهای شبکه

**lattice parameters**

ابعاد خطی و زاویه‌ای سلول واحد بلورشناختی است.

[منبع: زیربند 3.19، استاندارد ISO 21432: 2019]

۱۵-۲-۳

زاویه پراکندگی

**scattering angle**

زاویه بین جهت ذره (۳-۱-۵) یا فوتون فرودی و جهتی که ذره یا فوتون پس از پراکندگی می‌پیماید.

[منبع: زیربند 4.18، استاندارد ISO 18115-1: 2013]

۱۶-۲-۳

پتانسیل زتا

**zeta potential**

پتانسیل الکتروجنبشی

**electrokinetic potential**

تفاوت پتانسیل الکتریکی بین صفحه برشی<sup>۱</sup> و مایع توده است.

یادآوری - پتانسیل الکتروجنبشی با یکای ولت بیان می‌شود.

[منبع: زیربند ۶-۴-۵، استاندارد ملی ایران - ایزو شماره ۶-۴-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

۱۷-۲-۳

فلورسانس

**fluorescence**

پدیده‌ای است که در آن نور با یک طول موج مشخص به وسیله ماده جذب شده و با طول موج بلندتری از آن نشر می‌یابد.

[منبع: زیربند ۴-۵-۱۲، استاندارد ملی ایران - ایزو شماره ۶-۴-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

۱۸-۲-۳

دمای کوری

**Curie temperature**

دمایی که در آن یک ماده فرومغناطیس از حالت فرومغناطیس به حالت پارامغناطیس یا بالعکس گذار می‌کند.

[منبع: زیربند ۳-۳، استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۰۶۷۶: سال ۱۳۹۳]

۱۹-۲-۳

نفوذپذیری گرمایی

---

1- Slipping plane

### thermal diffusivity

نسبت رسانایی گرمایی به ظرفیت گرمایی ویژه در واحد جرم، که سرعتی را توصیف می‌کند که در آن گرما از طریق یک ماده جریان می‌یابد و با یکای  $m^2/s$  بیان می‌شود.

[منبع: زیربند ۱-۲، استاندارد ملی ایران شماره ۱۸۴۰۹: سال ۱۳۹۳]

۲۰-۲-۳

### انحلال پذیری

### solubility

بیشینه جرم یک نانوماده که در یک حجم معین از یک حلال خاص تحت شرایط مشخص قابل حل است.

یادآوری - انحلال پذیری با یکای گرم بر لیتر حلال بیان می‌شود.

[منبع: زیربند ۳-۱۷، استاندارد ملی ایران شماره ۱۹۸۱۶-۲: سال ۱۳۹۷]

۲۱-۲-۳

### پراکنش پذیری

### dispersibility

مشخصه یا خاصیت کمی یا کیفی از یک ماده منبع ذره‌ای که سهولت پراکنش ماده مذکور در یک فاز پیوسته را ارزیابی می‌کند.

یادآوری ۱- توزیع یکنواخت فضایی (همگنی) فاز پخش شده، به‌عنوان یک جزء جدایی‌ناپذیر از نقطه نهایی مطلوب در نظر گرفته می‌شود.

یادآوری ۲- اندازه ذره (۲-۲-۳) یا توزیع اندازه ذره (۳-۲-۳) غالباً به‌عنوان نقطه پایانی نسبت به معیار تعریف شده برای کاربرد ویژه، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یادآوری ۳- پراکنش پذیری به یک فرآیند پراکنش معین و زمان فرآیند خاص اشاره دارد.

یادآوری ۴- پایداری پراکنش، علیرغم اینکه یک پدیده مرتبط است، نباید با پراکنش پذیری اشتباه گرفته شود.

[منبع: زیربند 3.6، استاندارد ISO/TS 22107:2021]

## ۴ کوتاه‌نوشت‌ها

برای اهداف این استاندارد، کوتاه‌نوشت‌های زیر به کار می‌روند.

در فهرست کوتاه‌نوشت‌های زیر، توجه داشته باشید که بسته به مفهوم، "M" که به‌عنوان «میکروسکوپی» در نظر گرفته می‌شود، ممکن است به‌طور یکسان برای «میکروسکوپ» و "S" که به‌عنوان «طیف‌سنجی» در نظر گرفته می‌شود، ممکن است به‌طور یکسان برای «طیف‌سنج» در نظر گرفته شود.

کوتاه نوشتها	معادل انگلیسی	معادل فارسی
1D	one dimensional	یک بعدی
2D	two dimensional	دو بعدی
3D	Three dimensional	سه بعدی
AES	Auger electron spectroscopy	طیف سنجی الکترون اوژه
AFM	Atomic force microscopy	میکروسکوپی نیروی اتمی
AGFM	Alternating gradient-field magnetometer	مغناطیس سنج گرادپان میدان متناوب
APM	Aerosol particle mass analyser	تحلیلگر جرم ذره هواسل
APS	Aerodynamic particle sizing	اندازه سنجی ذره آئرو دینامیک
ARPES	Aerodynamic particle sizing	طیف سنجی نور گسیل فرابنفش با تفکیک زاویه ای
ATR	Attenuated total reflectance	بازتاب کلی تضعیف شده
BET method	Brunauer, Emmet and Teller method	روش بت
CLS	Centrifugal liquid sedimentation	ته نشینی مرکز گریز مایع
CPC	Condensation particle counter	شمارنده تراکم ذره
CVC	Colloid vibration current	جریان ارتعاش کلویید
DC	Direct current	جریان مستقیم
DCS	Differential centrifugal sedimentation	ته نشینی مرکز گریز تفاضلی
DEMC	Differential electrical mobility classifier	طبقه بندی کننده تحرک پذیری الکتریکی تفاضلی
DLS	Dynamic light scattering	پراکندگی پویای نور
DMAS	Differential mobility analysis system	سامانه آنالیز تحرک پذیری تفاضلی
DRIFT	Diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy	طیف سنجی تبدیل فوریه فرورسرخ بازتاب انتشاری
DSC	Differential scanning calorimetry	گرماسنجی روبشی تفاضلی
EBSD	Electron backscatter diffraction	پراش الکترون برگشتی
EDX	Energy dispersive X-ray spectroscopy	طیف سنجی پرتو ایکس تفکیک انرژی یادآوری - EDS کوتاه نوشت دیگر برای این روش است.
EELS	Electron energy loss spectroscopy	طیف سنجی اتلاف انرژی الکترون
EGA	Evolved gas analyser	آنالیز گاز بیرون داده شده (خروجی)
EL	Electroluminescence	درخشایی الکتریکی
ELPI	Electrical low-pressure impaction	برخوردگری کم فشار الکتریکی
EPR	Electron paramagnetic resonance	تشدید پارامغناطیسی الکترونی
ESA	Electrokinetic sonic amplitude	دامنه صوتی الکترو جنبشی
ESR	Electron spin resonance	تشدید اسپین الکترون
FFF	Field-flow fractionation	جزء جزء کردن جریان با میدان
FIB	Focused ion beam	باریکه یونی متمرکز

FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy	طیف‌سنجی فرسرخ تبدیل فوریه
HRTEM	High-resolution transmission electron microscopy	میکروسکوپی الکترونی عبوری با وضوح بالا
LD	Laser diffraction	پراکندگی لیزر
ICP	Inductively coupled plasma	پلاسمای جفت‌شده القایی
ICP-AES	Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy	طیف‌سنجی نشر اتمی-پلاسمای جفت‌شده القایی
ICP-OES	Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy	طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت‌شده القایی
ICP-MS	Inductively coupled plasma mass spectrometry	طیف‌سنجی جرمی- پلاسمای جفت‌شده القایی
IR	Infrared	فرسرخ
LALS	Low angle light scattering	پراکندگی نور زاویه کم
LEED	Low-energy electron diffraction	پراکندگی الکترونی کم‌انرژی
LEIS	Low-energy ion scattering	پراکندگی یونی کم‌انرژی
MALS	Multi-angle light scattering	پراکندگی نوری چندزاویه‌ای
MFM	Magnetic force microscopy	میکروسکوپی نیروی مغناطیسی
MOKE	Magneto-optical Kerr effect	اثر مغناطیسی-نوری کِر
NP	Nanoparticle	نانوذره
NIR	Near infrared	فرسرخ نزدیک
NMR	Nuclear magnetic resonance	تشدید مغناطیسی هسته
NOAA	Nano-objects, and their agglomerates and aggregates	نانوذرات و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آنها
OPC	Optical particle counter	شمارشگر نوری ذره
PAS	Photoacoustic spectroscopy	طیف‌سنجی نورصوتی
PFM	Piezoforce microscopy	میکروسکوپی نیروی پیزو
PL	Photoluminescence	نوردرخشایی
PSD	Particle size distribution	توزیع اندازه ذره
PTA	Particle tracking analysis	تحلیل ردیابی نانوذرت
QMS	Quadrupole mass spectrometer	طیف‌سنج جرمی چهارقطبی
RALS	Right angle light scattering	پراکندگی نور زاویه قائمه
RF	Radio frequenc	بسامد رادیویی
RBM	Radial breathing mode	مد تنفس شعاعی
RHEED	Reflection high-energy electron diffraction	پراش الکترون بازتابی با انرژی بالا
RLC	Resistor, inductor and capacitor	مقاومت، القاگر و خازن
RMM	Resonant mass measurement	اندازه‌گیری جرمی تشدید
SAXS	Small angle X-ray scattering	پراکندگی پرتو ایکس زاویه کوچک
SEM	Scanning electron microscopy	میکروسکوپی الکترونی روبشی
SIMS	Secondary ion mass spectroscopy	طیف‌سنجی جرمی یون ثانویه
SLS	Static light scattering	پراکندگی ایستا نور

SMLS	Static multiple light scattering	پراکندگی چندگانه ایستا نور
SMPS	Scanning mobility particle spectrometer	طیف‌سنج روبشی تحرک‌پذیری ذره
sp-ICP-MS	Single particle ICP-M	طیف‌سنجی جرمی - پلاسمای جفت‌شده القایی تک‌ذره
SPR	Surface plasmon resonance	تشدید پلاسمون سطحی
SP-STM	Spin polarized scanning tunnelling microscopy	میکروسکوپی تونل‌زنی روبشی پولاریزه‌شده با اسپین
SThM	Scanning thermal microscopy	میکروسکوپی گرمایی روبشی
STM	Scanning tunnelling microscopy	میکروسکوپی تونل‌زنی روبشی
STS	Scanning tunnelling spectroscopy	طیف‌سنجی تونل‌زنی روبشی
SQUID	Superconducting quantum interference device	دستگاه تداخل کوانتومی ابررسانا
TEM	Transmission electron microscopy	میکروسکوپی الکترونی عبوری
TGA	Thermogravimetric analysis	آنالیز گرماوزن‌سنجی
TOF	Time of flight	زمان پرواز
TXRF	Total reflection X-ray fluorescence	فلورسانس بازتاب کلی پرتو ایکس
UHV	Ultra-high vacuum	خلأ بسیار بالا
UV-Vis	Ultraviolet-visible	فرابنفش-مرئی
USAXS	Ultra-small angle X-ray scattering	پراکندگی زاویه بسیار کوچک پرتو ایکس
VSM	Vibrating sample magnetometer	مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش
WAXS	Wide angle X-ray scattering	پراکندگی زاویه باز پرتو ایکس
XRD	X-ray diffraction	پراش پرتو ایکس
XRF	X-ray fluorescence spectroscopy	طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس
XPS	X-ray photoelectron spectroscopy	طیف‌سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس

## ۵ رویکردهایی برای تعیین اندازه‌دها با هدف مشخصه‌یابی نانواشیاء و انبوه‌ها و کلوخه‌های آن‌ها و مواد حاوی نانواشیاء

### ۱-۵ روش اجرایی

انتخاب اندازه‌دها برای مشخصه‌یابی NOAAs از طریق نوع و کیفیت اطلاعات موردنیاز کاربر تعریف می‌شود. معمولاً چندین روش برای یک اندازه‌ده معین در دسترس است و بنابراین روش(ها) یا فنون انتخاب شده باید برای هدف مناسب و با ماده نمونه سازگار باشد.

در این استاندارد، اندازه‌دها از دسته‌های مختلف توضیح داده شده‌اند. توصیه می‌شود از یک یا بیشتر از یکی از اندازه‌دها برای مشخصه‌یابی NOAAs استفاده شود. اندازه‌دهایی که باید استفاده شوند به اطلاعات مورد نیاز کاربر بستگی دارند. خیلی اوقات کاربر به بیش از یک اندازه‌ده نیاز دارد؛ به‌عنوان مثال اندازه، شکل، بار و شیمی، بنابراین اندازه‌دها از زیربندهای مختلف این استاندارد باید در صورت نیاز استفاده شوند.

کاربر نباید «اندازه‌ده» را با «روش» اشتباه کند، دومی یک ابزار برای دستیابی به اولی است. همچنین کاربر باید بداند که روش‌های مختلفی که به صورت اسمی نوع یکسانی از اطلاعات را فراهم می‌سازند، به عنوان مثال اندازه، در واقع به دلیل تفاوت وابسته به روش و سایر عوامل، می‌توانند نتایج متفاوتی را به همراه داشته باشند. بنابراین، در صورت عملی بودن، یک رویکرد متعامد (استفاده از روش‌های متعامد چندگانه) باید برای تعیین اندازه‌ده زمانی که وابستگی‌های روش شناخته شده یا مورد تردید هستند، به کار برده شود. از سوی دیگر، اگر روش‌های گوناگون دقیقاً اندازه‌ده یکسانی را هدف قرار داده‌اند، زمانی که این اندازه‌ده مشخصاً تعریف شده است، به عنوان مثال به وسیله اصول بنیادی یا ساختاری، آنگاه نتایج باید همیشه قابل قیاس و مستقل از روشی باشند که آنها را فراهم کرده است، مشروط بر اینکه روش‌ها به درستی کالیبره شده باشند.

## ۲-۵ انواع اندازه‌ده‌ها

برای کمک به کاربر برای انتخاب اندازه‌ده‌ها و روش‌ها و فنون معین، این استاندارد اندازه‌ده‌ها را برای مشخصه یابی نانواشیاء براساس روش‌های رایج مورد استفاده و تفکیک شده به «انواع» اندازه‌ده‌ها توصیف می‌کند. جداول و متن در هر زیربند موارد زیر را توصیف می‌کند:

الف- اندازه‌ده نهایی<sup>۱</sup>: این اندازه‌ده معمولاً به عنوان خروجی نهایی مورد نظر برای اندازه‌گیری است.

ب- اندازه‌ده ویژه هر روش<sup>۲</sup>: اندازه‌ده‌های اندازه‌گیری شده با دستگاه هستند و به اندازه‌ده نهایی مرتبط هستند. نتایج به دست آمده با روش‌های مختلف به دلیل تفاوت در اصول اندازه‌گیری فیزیکی زیربنایی روش می‌تواند به طور قابل توجهی با یکدیگر متفاوت باشد.

پ- گستره و تفکیک‌پذیری فنون خاص: برای یک‌گانه‌هایی که به اندازه‌ده خاص بستگی دارند و برای دستگاه‌های تجاری معمول کنونی هستند، استفاده می‌شوند. دستگاه‌های تحقیقاتی پیشرفته می‌توانند تفکیک‌پذیری بالاتری نسبت به آنچه گفته شد، داشته باشند. تفکیک‌پذیری هر اندازه‌ده و روش متفاوت است و با ابزارهای مختلف محاسبه می‌شود. تفکیک‌پذیری می‌تواند بسته به روش، درصدی از اندازه اندازه‌ده، توان تفکیک دو قله یا عملکرد نهایی یک دستگاه باشد. تفکیک‌پذیری تنها به عنوان راهنما ارائه شده است و در اینجا به تفصیل مورد بحث قرار نگرفته است.

ت- محدودیت‌ها و مراجع: مراجع استانداردهای ISO در صورت در دسترس بودن، بیان شده‌اند. برای اطلاعات بیشتر باید این مراجع مورد مشورت قرار گیرند. محدودیت‌ها به محدودیت‌های روش اشاره دارند.

## ۳-۵ حالت نانواشیاء

نانواشیاء در حالات گوناگونی وجود دارند که خلاصه‌ای از آنها در جدول ۱ بیان شده است. برای آنالیز، روش‌ها مستلزم این هستند که نانواشیاء در شکل‌های مختلف یا فازهای پراکنده شده باشند.

1- Overarching measurand  
2- Measurand specific to method



ماده مورد آزمون می‌تواند به‌طور کامل فقط از نانواشیاء تشکیل شده باشد یا حاوی درصدی از نانواشیاء باشد که این درصد ممکن است به‌وسیله اندازه‌دهی‌های مختلف مثل تعداد یا جرم و در نتیجه روش‌های مختلف، اندازه‌گیری شود. درجه و طبیعت پراکنش نانواشیاء نیز اهمیت دارد و توصیه می‌شود در نظر گرفته شود. به بند ۱۵ مراجعه شود.

جدول ۱- حالات مختلف نانواشیاء

فاز پراکنده			فاز پیوسته
جامد	مایع	گاز	
نانوچندسازه، مخلوط نانوپودر/پودر نانو ساختار	ماده نانومتخلخل	ماده نانومتخلخل نانوکف جامد	جامد
نانوتعلیق/کلوئید	نانوامولسیون	نانوکف مایع	مایع
نانوهواسل (جامد)	نانوهواسل (مایع)	(به کار برده نمی‌شود)	گاز

عوامل دیگری که باید در نظر گرفته شوند شامل آماده‌سازی نمونه است. در اینجا، حالت نانواشیاء قبل، حین و بعد از آماده‌سازی نمونه و قبل از آنالیز می‌تواند به‌طور قابل توجهی متفاوت باشد و نتایج اندازه‌گیری شده را تحت تاثیر قرار دهد. مثال‌ها شامل نوع و مدت زمان امواج‌دهی با صوت، متغیرها، روش‌های استخراج و رسوب می‌شود.

## ۶ اندازه‌دهی‌های مربوط به اندازه‌گیری اندازه و شکل نانواشیاء و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آن‌ها

### ۱-۶ کلیات

شکل، اندازه میانگین و توزیع اندازه ذرات NOAA تاثیر زیادی بر خواص ذاتی آنها یا خواص مواد چندسازه حاوی آن‌ها دارند. بسپارها و کشسان‌های تقویت‌شده با پرکننده‌های در اندازه نانو، مواردی به‌عنوان نمونه هستند.

نانواشیاء و مواد حاوی آن‌ها باید در طول چرخه عمر خود مشخصه‌یابی شوند. چندین مرحله زمانی قابل شناسایی را می‌توان تعیین کرد که در آن مشخصه‌یابی می‌تواند مناسب باشد. این موارد عبارتند از: پس از سنتز، بعد از حمل و نقل، بعد از ذخیره‌سازی و پردازش قبل از استفاده. این مشخصه‌یابی اجازه بررسی اینکه آیا اندازه‌دهی خواصی را که برای آن‌ها طراحی شده‌اند را نمایش می‌دهند یا خیر، فراهم می‌کند. این مورد حتی اگر رابطه بین مشخصه‌های ذاتی نانواشیاء و خاصیت کاربردی موردنظر (به‌عنوان مثال نوری، الکتریکی و مکانیکی) به‌طور کامل قابل درک نباشد، برقرار است. با توجه به اندازه و شکل، مشخصه‌یابی آن‌ها توصیه می‌شود به‌شکل خشک و یا پراکنه مایع، بسته به روش آنالیزی مورد استفاده، انجام گیرد. با توجه به احتمال اثرات توکسیکولوژیکی برخی از نانواشیاء، روش‌های اندازه‌گیری در بستر هوا، چه در محل کار و چه در هوای محیط در مجاورت خط تولید می‌تواند مفید باشد. در این مورد، اندازه‌گیری‌های درجا و آنی ترجیح داده

می‌شوند زیرا اجازه پایش بر افت‌وخیز<sup>۱</sup> انتشار را می‌دهند، درحالی‌که روش‌های آزمایشگاهی کلاسیک بعد از نمونه‌برداری روی پایه مناسب استفاده می‌شوند. در زمان استفاده از موادی که حاوی نانوآشپا هستند، برخی از آنها می‌توانند در نتیجه سایش مکانیکی یا جوی مانند برش و یا سوراخ‌کاری مصالح ساختمانی، استهلاک رنگ‌ها یا جلادهنده‌ها، از ماده آزاد شوند. در این مورد اندازه‌گیری‌ها در هوا نیز موردنیاز است. نانوآشپا را می‌توان بر روی سطوح پوشش داد تا به‌عنوان مثال خواص ضدباکتریایی، نوری یا خودتمیزشوندگی<sup>۲</sup> را ارائه دهند. سپس اندازه‌گیری‌های ویژه‌ای از پارامترهای اندازه و شکل روی سطح مواد موردنیاز است. اندازه‌دهی ویژه و نهایی با توجه به روش‌های مورد استفاده و فاز پیوسته حاوی نانوآشپا، متفاوت هستند. این اندازه‌دهی‌ها و روش‌های مورد استفاده برای ارزیابی آنها در زیر ارائه شده‌است.

## ۲-۶ اندازه‌دهی‌های مربوط به اندازه‌گیری اندازه و شکل

### ۱-۲-۶ مرور کلی

توزیع اندازه ذره (PSD) فهرستی از مقادیر عددی است که نشان‌دهنده تعداد نسبی و یا در موارد نادر تعداد مطلق ذرات موجود در طبقه‌ها یا خانک‌های<sup>۳</sup> اندازه مختلف است که از کوچک‌ترین تا بزرگ‌ترین اندازه ذره را شامل می‌شود. تعدادی عوامل ارزشیابی متفاوت مقدار (انواع) وجود دارد که مرتبط‌ترین آنها عبارتند از:

الف- تعداد ذرات در یک طبقه اندازه؛

ب- مساحت سطح کل ذرات در یک طبقه اندازه؛

پ- حجم کلی ذرات در یک طبقه اندازه؛

ت- جرم ذرات در یک طبقه اندازه.

عوامل ارزشیابی مانند شدت نور پراکنده‌شده برای به‌دست آوردن توزیع‌های اندازه ذره در روش‌های استفاده از پراکندگی نور (به‌عنوان مثال DLS) به‌کار می‌روند. این PSDs را می‌توان با استفاده از مدل‌های ریاضی خاص به توزیع‌های اندازه ذره عددی یا حجمی تبدیل کرد که اغلب به فرضیاتی در مورد شکل کروی ذرات، چگالی یکنواخت ذرات یا دانش سایر پارامترهای فیزیکی مانند ضریب شکست نیاز دارند. در اینجا اصطلاح «ذره» به NOAAs اشاره دارد زیرا بسیاری از روش‌های مورداستفاده برای اندازه‌گیری اندازه قادر نیستند بین آنها تمایز قائل شوند و توزیع‌های اندازه ذره جداگانه را برای تک‌تک نانوآشپا و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آنها به‌دست آورند.

شکل، صورت هندسی بیرونی یک ذره است. هنگامی‌که روش‌های مشاهده مستقیم مانند میکروسکوپی به‌کار می‌روند، اندازه‌دهی‌های خاص‌تری می‌توانند در نرم‌افزار تحلیل تصویر برای توصیف شکل یک شیء تعریف

1- Fluctuations  
2- Self-washing  
3- Bins

شوند. اندازه‌دهی‌های رایج عبارتند از کشیدگی فِرِت<sup>۱</sup> (نسبت بین بیشینه و کمینه قطر فِرِت که در آن قطر فِرِت فاصله بین دو خط مماسی موازی در یک جهت معین است)، نسبت منظری (نسبت طول یک ذره به عرض آن) و تحدب (نسبت بین مساحت تصویرشده شیء و مساحت بدنه محدب آن).

توزیع شکل ذرات حاوی مقدار ذرات در طبقه‌های شکلی مختلف را می‌توان با استفاده از تحلیل تصویر به‌دست آورد. مقدار توزیع بر اساس تعداد ذره، مساحت و یا حجم آن طبقه‌بندی می‌شود.

یادآوری - هنگام به‌کارگیری تعریف نسبت منظری (یک پارامتر ۲ بعدی) در مورد مواد با شکل‌های مختلف (که ۳ بعدی هستند) باید دقت شود. طول‌های مرتبط به ریخت‌شناسی نانوشیء بستگی دارد، به‌عنوان مثال، ذره در مقابل میله در مقابل صفحه.

### ۲-۲-۶ استانداردهای عمومی مرتبط

ISO 9276-1, Representation of results of particle size analysis - Part 1: Graphical representation

ISO 9276-2, Representation of results of particle size analysis - Part 2: Calculation of average particle sizes/diameters and moments from particle size distributions

ISO 9276-3, Representation of results of particle size analysis - Part 3: Adjustment of an experimental curve to a reference model

ISO 9276-4, Representation of results of particle size analysis - Part 4: Characterization of a classification process

ISO 9276-5, Representation of results of particle size analysis - Part 5: Methods of calculation relating to particle size analyses using logarithmic normal probability distribution

ISO 9276-6, Representation of results of particle size analysis - Part 6: Descriptive and quantitative representation of particle shape and morphology

ISO 26824, Particle characterization of particulate systems - Vocabulary

ISO/TS 80004-6, Nanotechnologies - Vocabulary- Part 6: Nano-object characterization

### ۳-۶ اندازه‌دهی‌های مربوط به اندازه‌گیری اندازه و شکل در هواسل‌ها

#### ۱-۳-۶ مرور کلی

نانواشیاء در تمام بسترهایی که در آنها توزیع می‌شوند در معرض انبوهه شدن و کلوخه شدن هستند. این امر به‌ویژه در مورد هواسل‌ها که انبوهه‌ها و کلوخه‌ها در اغلب شرایط وجود دارند، صادق است. در نتیجه، روش‌های اندازه‌گیری نه تنها در گستره نانومقیاس بلکه برای ذرات بالای ۱۰۰ nm نیز باید قابل اجرا باشند.

جدول ۲ خلاصه‌ای از اندازه‌دهی‌ها و روش‌های مورد استفاده برای تعیین اندازه و شکل نانواشیاء در هواسل‌ها را ارائه می‌دهد. در این جدول و جدول‌های بعدی در این استاندارد، اصطلاح «اندازه‌دهی نهایی» به پارامتر فیزیکی اشاره دارد که روش مربوط به اندازه‌گیری آن در نظر گرفته شده است. اصطلاح «اندازه‌دهی(های) ویژه هر روش»

1- Feret elongation

به پارامتر فیزیکی اشاره دارد که در واقع به وسیله آن روش، اندازه‌گیری می‌شود. به‌عنوان مثال، در برخوردگری الکتریکی<sup>۱</sup>، لختی ذرات، اندازه‌ده ویژه است زیرا مسیر حرکت آنها را در افزاره و بنابراین صفحه‌ای که آنها را جمع‌آوری می‌کند، مشخص می‌کند. این صفحه با یک طبقه اندازه قطر آئرو دینامیک خاص مطابقت دارد (مقدار ذرات روی این صفحه- و روی همه صفحات دیگر- توزیع اندازه ذره را تولید می‌کند که اندازه‌ده نهایی است). اصطلاح «تفکیک‌پذیری» به کمینه اندازه قابل‌دستیابی از طریق روش به‌کار رفته اشاره نمی‌کند (این کمینه اندازه با «گستره اندازه متداول» مشخص می‌شود)، بلکه به توانایی تمایز دو اندازه متفاوت اشاره دارد: بنابراین عمدتاً با تعداد گزینه‌های اندازه‌گیری که معمولاً به وسیله افزاره‌ها ارائه می‌شوند، مرتبط است.

«محدودیت» به اشکال اصلی روش اشاره دارد. این محدودیت می‌تواند گستره غلظت، زمان اندازه‌گیری یا حداقل اندازه قابل‌دستیابی باشد. حتی اگر یک روش خاص، PSD وزن‌دهی شده عددی را بدهد، گستره غلظت به صورت غلظت‌های جرمی داده می‌شود زیرا قبل از اندازه‌گیری به‌راحتی مشخص می‌شود، برای مثال، با نمونه‌برداری از فیلترها.

جدول ۲ شامل روش‌هایی است که آنی اندازه‌گیری می‌کنند، به استثنای برخوردگری آبشاری در انتهای جدول که دو روش میکروسکوپی را مشخص می‌کند. روش‌های آنی فقط اندازه را اندازه‌گیری می‌کنند درحالی‌که روش‌های میکروسکوپی می‌توانند علاوه‌بر اندازه، شکل را نیز اندازه‌گیری کنند.

---

1- Electrical impaction

جدول ۲- اندازه‌دهی‌های مربوط به اندازه‌گیری اندازه و شکل در هواسل‌ها

اندازه‌ده نهایی	اندازه‌ده ویژه هر روش	روش	گستره اندازه	تفکیک پذیری	محدودیت‌ها	مراجع
توزیع اندازه وزن‌دهی شده عددی، به‌طوریکه «اندازه» قطر آئرودینامیکی معادل ذره است.	آشکارسازی الکتریکی از برخوردگری	ELPI	قطر آئرودینامیکی معادل میانگین بین ۶ nm و ۱۰ μm	معمولا ۱۳ طبقه تا ۵۰۰ طبقه یا خانک اندازه تقسیم‌شده در کل گستره اندازه	گستره غلظت: $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ تا $\text{mg}/\text{m}^3$ ۱۰۰ چگالی ذره باید مشخص باشد. مشکلات واگشتی ذره و انتقال بار	[1]
توزیع اندازه وزن‌دهی شده جرمی	لختی	برخوردگری آبشاری	۱۰ nm تا ۱۸ μm (بسته به طراحی خاص)	معمولا بین ۳ طبقه تا ۱۴ طبقه یا خانک مجزا در کل گستره اندازه		
تعداد- توزیع اندازه تحرک پذیری الکتریکی	تحرک پذیری الکتریکی	DMAS	۳ nm تا ۱۰۰۰ nm	زیر nm	اندازه‌گیری حداقل ۱ دقیقه زمان می‌برد- با پدیده‌های سریع سازگار نیست.	[2]
توزیع اندازه وزن‌دهی شده عددی، «اندازه» قطر نوری معادل ذرات است.	سطح مقطع پراکندگی	OPC	۰٫۵ μm تا ۲۰ μm	۰٫۱ μm	برای NOAA، فقط کلوخه‌های $< 0.5 \mu\text{m}$ (مورد نانوصفحه) قابل استفاده است. ضریب شکست باید مشخص باشد.	[3]
توزیع اندازه آئرودینامیکی وزن‌دهی شده جرمی	سرعت	APS	۰٫۵ μm تا ۲۰ μm	۰٫۱ μm	تفکیک پذیری برای ذرات غیرکروی پایین‌تر است.	[4]
اندازه و شکل NOAA	اندازه و شکل تصویر شده دوبعدی NOAA. توزیع شکل و اندازه هندسی وزن‌دهی شده عددی	نمونه‌بردار ذرات با TEM و تحلیل تصویر	۱ nm تا ۱۰ μm	۰٫۲ nm	کارآیی نمونه‌برداری نوعی یک کمینه (۱۰٪) در ۲۰ nm تا ۳۰ nm دارد. TEM یک روش آنی نیست.	[5], [6]
اندازه و شکل NOAA	اندازه و شکل تصویر شده دوبعدی NOAA. توزیع شکل و اندازه هندسی وزن‌دهی شده عددی	SEM از فیلترها	۵ nm تا ۱ mm	۵ nm	نیاز به آماده‌سازی نمونه روی یک بستره آهسته و مجزا. SEM یک روش آنی نیست.	[7]

یادآوری - در جدول ۲ و جدول‌های بعدی، گستره اندازه پارامترها، تفکیک‌پذیری و محدودیت‌ها به روش اندازه‌گیری مربوط می‌شوند.

### ۲-۳-۶ استانداردهای عمومی مرتبط

ISO/TR 18196, Nanotechnologies - Measurement technique matrix for the characterization of nano-objects

ISO/TR 27628, Workplace atmospheres - Ultrafine, nanoparticle and nano-structured aerosols- Inhalation exposure characterization and assessment

### ۳-۳-۶ برخوردگری کم‌فشار الکتريکی (ELPI)

در روش ELPI، ذرات هوا سل ابتدا با یک اثر تاجی شکل<sup>۱</sup> باردار می‌شوند و به یک برخوردگر<sup>۲</sup> کم‌فشار مجهز به چندین صفحه فرستاده می‌شوند. بزرگ‌ترین ذرات (یا انبوهه‌ها و کلوخه‌ها)، به علت حرکت لختی‌شان، روی صفحات بالایی جمع شده در حالی که کوچک‌ترین آنها، روی صفحات پایینی جمع می‌شوند. هر صفحه مجهز به یک سامانه شمارشگر الکتريکی است که سیگنالی متناسب با بار الکتريکی دریافت شده به وسیله صفحه می‌فرستد. به این ترتیب یک عدد PSD حاوی تعدادی از طبقه‌های اندازه برابر با تعداد صفحات در برخوردگر به دست می‌آید.

اندازه‌ده ویژه مرتبط با این روش، لختی اشیاء است. این اندازه‌ده مستقیماً با چگالی و قطر آئرو دینامیک برای یک جریان گاز معین، مرتبط است. بنابراین، هر صفحه ذرات را در یک گستره قطر آئرو دینامیکی معین با چگالی مشخص جمع‌آوری می‌کند.

در هر صفحه، تعداد کل ذرات جمع‌آوری شده در گستره جرم یا قطر متناظر، از سیگنال جریان الکتريکی اندازه‌گیری شده به دست می‌آید. این امر پس از تعیین تجربی کارکرد بازده شارژر امکان‌پذیر است. برای هر قطر آئرو دینامیکی، این کارکرد اتلاف ذره در داخل شارژر، کسری از ذرات باردار و بار متوسط آنها را در نظر می‌گیرد. چگالی ذرات باید معلوم باشد. توزیع‌های اندازه وزن‌دهی شده عددی را می‌توان با این روش به دست آورد.

طراحی‌های پیشرفته اخیر (برخوردگرهای کم‌فشار الکتريکی با تفکیک‌پذیری بالا) می‌توانند توزیع اندازه را تا ۵۰۰ طبقه بندی شده براساس اندازه را ممکن می‌سازد.

چون در این روش فرض بر این است که ذرات کروی هستند، قادر به ارائه اطلاعات مستقیم در مورد شکل نانو اشیاء نیست. با این حال، برای به دست آوردن اطلاعات شکل، بررسی ذرات مجزا روی صفحات با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی امکان‌پذیر است.

1- Corona effect

2- Impactor

### ۴-۳-۶ برخوردگرهای آبشاری

طراحی‌های دیگر عبارتند از برخوردگرهای آبشاری ۱۳ و ۱۴ مرحله‌ای که ذرات را براساس لختی آنها به ۱۳ یا ۱۴ کسرهای اندازه در گستره ۱۶nm تا ۱۰ μm طبقه‌بندی می‌کنند. هر مرحله قبل و بعد از اندازه‌گیری وزن می‌شود: بنابراین، توزیع اندازه ذره وزن‌دهی شده جرمی به دست می‌آید.

برخوردگرهای نهشتی یکنواخت میکرو-روزنه<sup>۱</sup>، برخوردگرهای آبشاری هستند که برای جزء کردن ذرات هواسل براساس اندازه آئرویدینامیک آنها استفاده می‌شوند. برخوردگرهای نهشتی با سایر برخوردگرهای آبشاری رایج از این نظر تفاوت دارند که از تعداد زیادی افشانک‌های میکرو-روزنه به منظور کاهش سرعت جت و افت فشار، به حداقل رساندن واگشت ذره و بازهمراه‌بری<sup>۲</sup> و افزایش کارایی جمع‌آوری استفاده می‌کنند. این امر منجر به مشخصه‌های اندازه-برش تیزتر و توزیع‌های اندازه وزن‌دهی شده جرمی درست‌تر می‌شود.

**یادآوری-** برخوردگرهای الکتریکی معمول، گستره اندازه را در مرتبه ۱۶ nm تا ۱۰ μm تعیین می‌کنند. گستره غلظت جرمی قابل‌اندازه‌گیری به اندازه بستگی دارد. به‌عنوان مثال، برای یک قطر آئرویدینامیک ۱۰۰ nm، این گستره حدود  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  تا  $100 \text{mg}/\text{m}^3$  است.

### ۵-۳-۶ سامانه آنالیز تحرک‌پذیری تفاضلی

یک سامانه آنالیز تحرک‌پذیری تفاضلی، که تحت عنوان SMPS نیز شناخته می‌شود، تلفیقی از یک طبقه‌بندی‌کننده تحرک‌پذیری الکتریکی تفاضلی (DEMC) و یک شمارنده تراکم ذره (CPC) است. در اینجا، ذرات در ابتدا به وسیله یک منبع رادیواکتیو، طبق قانون توزیع بار تعادلی فوش<sup>۳</sup>، باردار می‌شوند. یک میدان الکتریکی قابل‌تنظیم بین دو الکترود اعمال می‌شود تا مسیر اشیاء باردار وارد شده به DEMC را منحرف کند. از آنجائی که این انحراف متناسب با تحرک‌پذیری الکتریکی است، هر تنظیم ولتاژ یک طبقه اندازه خاص از اشیاء را از سامانه استخراج می‌کند. روش DEMC اساساً به‌عنوان یک فیلتر عبور نوار<sup>۴</sup> عمل می‌کند و تنها به اشیاء با یک اندازه تحرک‌پذیری خاص اجازه خروج از ستون را می‌دهد. تحرک‌پذیری الکتریکی با نسبت بار به اندازه تعیین می‌شود. برای کره‌های تک‌بار، اندازه معادل قطر کروی هندسی شیء است. برای اشیاء غیرکروی، اندازه برابر با قطر تحرک‌پذیری کروی معادل است که نیروی پَسار<sup>۵</sup> یکسانی را با شیء اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. یک شمارنده تراکم ذره قرار داده شده در خروجی، غلظت عددی هر طبقه را با استفاده از روش مبتنی بر نور ثبت می‌کند. بنابراین یک توزیع اندازه تحرک‌پذیری معمول در گستره اندازه ۳ nm تا ۱۰۰۰ nm به دست می‌آید، اگرچه دستگاه‌های جدید گستره اندازه را تا ۰٫۵ nm بهبود می‌بخشند. ستون‌های مختلف (DEMCs) گستره‌های اندازه متفاوتی را در DMAS کلاسیک پوشش می‌دهند و CPCs مختلف حد تشخیص‌های متفاوتی را نشان می‌دهند. اندازه‌ده ویژه دخیل در این روش،

- 
- 1- Micro-orifice uniform deposit impactors
  - 2- Reentrainment
  - 3- Fuchs
  - 4- Band pass filter
  - 5- Drag force

تحرك پذیری الکتريکی است که به طور مستقیم با بار و قطر آئرو دینامیک اشیاء مرتبط است چراکه قانون بار آن‌ها شناخته شده است. اطلاعات مربوط به شکل اشیاء را نمی‌توان به طور مستقیم به دست آورد، اما مدل‌هایی برای برازش داده‌ها به یک تابع شکل شناخته شده، برای مثال توزیع‌های طول، برای استخراج وجود دارند. برای اشیاء بسیار ناهمسانگرد مانند نانوالیاف، قانون باردار شدن می‌تواند غیرقابل پیش‌بینی باشد، که منجر به عدم قطعیت‌های زیادی در نتایج می‌شود.

برخی از طراحی‌های جایگزین DEMC وجود دارند که در آنها یکی از الکترودها به چند بخش تقسیم می‌شود که هر کدام به الکتروسنج‌های خیلی حساس متصل هستند. این امر امکان بسط گستره اندازه روش را معمولاً از ۱۰ nm تا ۱۰ μm می‌دهد. طیف‌سنج اندازه ذره با تحرك پذیری بالا مثالی از چنین طراحی است و می‌تواند ذرات را در گستره از ۵-۶ nm تا ۵۶۰ nm با مجموع ۳۲ کانال اندازه‌گیری کند.

این طراحی‌ها خیلی سریع‌تر از یک DMAS کلاسیک هستند چراکه می‌توانند اندازه‌گیری‌ها را در بیش از یک مرتبه انجام دهند.

### ۶-۳-۶ استانداردهای مرتبط

ISO 27891, Aerosol particle number concentration - Calibration of condensation particle counters

EN ISO 28439, Workplace atmospheres - Characterization of ultrafine aerosols/nano aerosols - Determination of the size distribution and number concentration using differential electrical mobility analysing systems

### ۶-۳-۷ شمارشگر نوری ذره

هواسل حاوی نانو اشیاء به درون سلولی که با باریکه لیزر روشن شده، جریان می‌یابد. اشیایی که از باریکه عبور می‌کنند نور را براساس اندازه و شکل ذرات خود پراکنده می‌کنند. این پدیده ناشی از اثرات فیزیکی پراش، بازتاب و شکست است. یک آشکارساز نوری، درخش‌های<sup>۱</sup> نور دریافتی در یک زاویه خاص را به تپ‌های الکتريکی تبدیل می‌کند. با استفاده از ارتفاع و نرخ شمارش تپ‌ها، غلظت عددی و قطر کروی معادل را می‌توان از نظریه «مای<sup>۲</sup>» به دست آورد. برای توزیع‌های اندازه دقیق، ضریب شکست ذرات باید معلوم باشد. معمولاً این دستگاه با استفاده از یک هواسل تک‌پراکنه با ضریب شکست معین مانند لاتکس پلی‌استایرن کالیبره می‌شود. توزیع اندازه حاصل که به وسیله دستگاه نمایش داده می‌شود، براساس قطر معادل است. محاسبات پراکندگی مای، هم برای مدل کردن پاسخ دستگاه‌ها و هم برای معکوس کردن داده‌های حاصله، استفاده شده‌اند اما به آگاهی از ضریب‌های شکست و شکل ذره محدود می‌شوند. با استفاده از این شمارشگرها، توزیع اندازه معادل نوری وزن‌دهی شده عددی را می‌توان در گستره ۰.۳ μm تا ۲۰ μm اندازه‌گیری کرد. این گستره اندازه ممکن است برای مقیاس نانو نامربوط به نظر آید، اما مکمل اندازه‌گیری‌های SMPS است زیرا نانو ذرات غالباً در هواسل‌ها به شکل انبوه‌ها و کلوخه‌ها یافت می‌شوند.

1- Flashes

2- Mie theory



ISO 13320, Particle size analysis- Laser diffraction methods

ISO 21501-1, Determination of particle size distribution - Single particle light interaction methods - Part 1: Light scattering aerosol spectrometer

### ۹-۳-۶ اندازه‌سنجی ذره آئرو دینامیک

در اندازه‌سنجی ذره آئرو دینامیک (APS)، هواسل از طریق یک افشانک پمپ شده و شتاب می‌گیرد. ذرات خروجی از جت سرعتی دارند که به مساحت سطح و جرم آنها بستگی دارد. ذرات از دو باریکه لیزری عبور می‌کنند که با فاصله معلومی از هم جدا شده‌اند و دو تپ نور پراکنده شده را تولید می‌کنند. اندازه‌گیری تاخیر زمانی بین دو تپ امکان تعیین سرعت را می‌دهد. قطر آئرو دینامیک ذرات (اندازه نهایی) از سرعت اندازه‌گیری شده، با فرض شکل کره‌ای و چگالی واحد، به دست می‌آید. یک توزیع اندازه ذرات جرمی در گستره اندازه  $0.5\mu\text{m}$  تا  $20\mu\text{m}$  به دست می‌آید، بنابراین این روش فقط برای اندازه‌گیری انبوه‌ها و کلوخه‌های نانو اشیاء مناسب است و برای خود نانو اشیاء مناسب نیست.

### ۱۰-۳-۶ TEM تلفیق شده با نمونه‌گیرهای توری TEM

روش TEM یک روش میکروسکوپی است که در آن یک باریکه از الکترون‌ها از میان یک آزمون نازک عبور می‌کند تا تصویری شکل بگیرد. توزیع‌های اندازه و شکل هندسی وزن‌دهی شده عددی را می‌توان با استفاده از تحلیل تصویری میکروگراف‌های TEM، با برخی موانع و محدودیت‌ها، به دست آورد. معمولاً امکان به دست آوردن توزیع‌های اندازه ذره مجزا برای نانو اشیاء وجود ندارد، زیرا جداسازی ذرات اولیه در یک انبوه یا کلوخه، به‌ویژه با معیارهای خودکار مورد استفاده با نرم‌افزار، بسیار مشکل است. نانوالیاف بسیار بلند، مانند نانولوله‌های کربنی را به‌سختی می‌توان به‌عنوان الیاف مجزا از هم جدا کرد زیرا اغلب درون کلوخه‌های پیچیده درهم‌تنیده‌اند. هنگام استفاده از افزاره‌های نمونه‌برداری، نرخ جریان و مدت‌زمان نمونه‌برداری باید با دقت تنظیم شوند تا مقدار ذرات جمع‌آوری شده بهینه شود. در واقع، غلظت‌های پایین می‌تواند آمار شمارش را محدود کند درحالی‌که غلظت‌های بالا می‌توانند مانع شمارش شده و اشیاء هم‌پوشان به‌صورت ذره منفرد با نرم‌افزار دیده شوند. کالیبراسیون اولیه اندازه پیکسل باید با استفاده از مواد مرجع گواهی شده انجام شود.

نرم‌افزار تحلیل تصویر، دسترسی به توزیع‌های اندازه و شکل هندسی وزن‌دهی شده عددی (که به‌شکل قطر دایره‌ای معادل یا پارامترهای ابعادی گوناگون مانند طول، عرض، قطرهای فرت<sup>۱</sup>، محیط و مساحت تصویر شده بیان می‌شود) را فراهم می‌کند. معمولاً به شناسایی و جداسازی اشیاء از پس‌زمینه با استفاده از آستانه شدت اعمال شده بر یک تصویر سطح خاکستری نیاز است و عموماً به اطلاعات دو بعدی محدود می‌شود. توزیع‌های شکل را نیز می‌توان برای مثال با اندازه‌گیری نسبت منطری مجزای NOAA (طول تقسیم بر عرض) به دست آورد. روش TEM امکان تفکیک بین ذرات تشکیل‌دهنده را که می‌توانند ذرات اولیه و یا کلوخه‌ها و انبوه‌ها باشند، فراهم می‌کند.

1- Feret diameters

افزازه‌های نمونه‌برداری، جمع‌آوری ذرات هواسل را روی توری‌های TEM با تحلیل متعاقب در دستگاه برای به‌دست آوردن اطلاعات اندازه و شکل، ممکن می‌سازند.

روش‌های مختلفی برای جمع‌آوری نمونه در دسترس هستند. یک روش از توری‌های سوراخ‌دار TEM برای جمع‌آوری ذرات از طریق فیلتر کردن با استفاده از یک افزاره پمپ‌زنی استفاده می‌کند. سپس توری در یک میکروسکوپ الکترونی عبوری مورد بررسی قرار می‌گیرد. بازده جمع‌آوری - درصد ذرات حفظ‌شده روی توری برای یک طبقه اندازه معین - به اندازه ذرات بستگی دارد. از فیلترهای هپا<sup>۱</sup> قابل حل نیز می‌توان استفاده کرد. مثال: برای یک دستگاه با نرخ پمپ‌زنی ۰/۳ لیتر در دقیقه، بازده جمع‌آوری دارای حداقل مقدار حدود ۱۵٪ در ۲۰ nm تا ۳۰ nm است و در اندازه‌های پایین‌تر و بالاتر، بیشتر است [5].

روش دیگر از یک میدان الکتریکی تولیدشده به‌وسیله یک الکتروود برای رسوب‌دهی ذرات باردارشده هواسل روی یک توری TEM استفاده می‌کند. بازده جمع‌آوری به چندین پارامتر (تنش الکتریکی و قطر الکتروود) بستگی دارد. اندازه‌گیری غلظت با CPC قبل و بعد از نمونه‌برداری، بازده جمع‌آوری کلی ۵۰٪ را فراهم می‌کند. اما بازده واقعی جمع‌آوری در توری‌های TEM، آن چیزی که با TEM اندازه‌گیری شده، کمتر از ۱٪ است که به معنی اتلاف شدید در محلی درون افزاره است. ایراد این روش این است که ذرات باید باردار شوند.

#### ۱۱-۳-۶ استانداردهای مرتبط

ISO/TS 10797, Nanotechnologies - Characterization of single-wall carbon nanotubes using transmission electron microscopy

ISO 13322-1, Particle size analysis - Image analysis methods - Part 1: Static image analysis methods

ISO 13322-2, Particle size analysis - Image analysis methods - Part 2: Dynamic image analysis methods

ISO 21363, Nanotechnologies - Measurements of particle size and shape distributions by transmission electron microscopy

ISO/TR 27628, Workplace atmospheres - Ultrafine, nanoparticle and nano-structured aerosols - Inhalation exposure characterization and assessment

ISO 29301, Microbeam analysis- Analytical electron microscopy - Methods for calibrating image magnification by using reference materials with periodic structures

#### ۱۲-۳-۶ میکروسکوپی الکترونی روبشی

در روش SEM، یک باریکه الکترونی تولید شده، با ولتاژ بالا شتاب می‌گیرد، روی سطح نمونه متمرکز شده و آن را روبش می‌کند. در هر نقطه روبش‌شده روی سطح، برهم‌کنش نمونه-الکترون سیگنال‌های خاصی را می‌دهد که در میان آنها تصویربرداری الکترون ثانویه بازمودی از ریخت‌شناسی سطح را ارائه می‌کند. تصویربرداری الکترون پس‌پراکنده اطلاعاتی مربوط به ترکیب شیمیایی موضعی ارائه می‌دهد و فوتون‌های

---

1- HEPA

پرتو ایکس را می‌توان برای به‌دست آوردن اطلاعات در مورد آنها به کار برد. میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی همچنین می‌توانند در حالت عبوری کار کنند که اندازه‌گیری اندازه و شکل را تسهیل می‌کنند.

همچنین می‌توان از تحلیل خودکار تصویر نیز استفاده کرد. آستانه‌گذاری تصویر در این روش از میکروسکوپ الکترونی عبوری سخت‌تر است به این دلیل که تباین در تصویربرداری ثانویه که بهترین تفکیک‌پذیری عرضی را ایجاد می‌کند، به اندازه کافی قوی نیست و به ضخامت نانوشیء و عدد اتمی و نیز جهت‌گیری موضعی سطح با توجه به باریکه الکترونی بستگی دارد. تفکیک‌پذیری نهایی قابل‌دستیابی، بسته به دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد استفاده، ۱ nm تا ۵ nm است. اطلاعات اندازه و شکل معمولاً به اطلاعات دو بعدی محدود می‌شود.

دستگاه مورد استفاده ممکن است قدرت تفکیک کافی برای تشخیص ذرات بسیار کوچک ( $> 10 \text{ nm}$ ) را نداشته باشد. میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌تواند بین ذرات تشکیل‌دهنده و ذرات انبوه‌ها و کلوخه‌ها تمایز قائل شود.

ذرات هواسل به‌وسیله افزاره‌های پمپ‌زنی خاص با نرخ جریان کم یا زیاد، روی فیلترها جمع‌آوری می‌شوند. این افزاره‌ها را می‌توان با سرفیلترهای مختلف برای نمونه‌برداری از تمام مواد ذره‌ای یا ذرات کوچک‌تر از  $10 \mu\text{m}$ ،  $2.5 \mu\text{m}$  یا  $0.1 \mu\text{m}$  نصب کرد. این فیلترها را همچنین می‌توان فلزاندود کرد تا امکان مشاهده آنها در میکروسکوپ الکترونی روبشی پس از انتقال به پایه یا نگهدارنده‌های نمونه مناسب، فراهم شود. برای به‌دست آوردن چگالی به اندازه کافی کم به‌طوریکه امکان بررسی و اندازه‌گیری ذرات مجزا وجود داشته باشد، باید به چگالی نهشت دقت شود.

از میکروسکوپ الکترونی روبشی و سایر روش‌های میکروسکوپی همچنین می‌توان برای مطالعه خواص نانوچندسازه‌ها و سایر مواد با شاخصه‌های سطح در مقیاس نانو استفاده نمود.

#### ۱۳-۳-۶ استانداردهای مرتبط

ISO 13322-1, Particle size analysis- Image analysis methods - Part 1: Static image analysis methods

ISO 13322-2, Particle size analysis- Image analysis methods - Part 2: Dynamic image analysis methods

ISO/TR 27628, Workplace atmospheres - Ultrafine, nanoparticle and nano-structured aerosols - Inhalation exposure characterization and assessment

ISO 19749, Nanotechnologies - Measurements of particle size and shape distributions by scanning electron microscopy

#### ۴-۶ اندازه‌دهه‌های مربوط به اندازه‌گیری اندازه و شکل در پودرها

#### ۱-۴-۶ مرور کلی

جدول ۳ خلاصه‌ای از اندازه‌دهه‌ها و روش‌های مورد استفاده برای تعیین اندازه و شکل نانوآشیاء پودری را ارائه می‌دهد.

جدول ۳- اندازه‌دهی‌های مربوط به اندازه‌گیری اندازه و شکل در پودرها

اندازه‌دهی نهایی	اندازه‌دهی ویژه هر روش	روش	گستره اندازه	تفکیک پذیری	محدودیت‌ها	مراجع
اندازه و شکل NOAA	شکل و اندازه تصویر شده دوبعدی NOAA. توزیع‌های شکل و اندازه هندسی وزن‌دهی شده عددی	SEM	۵ nm تا ۱ mm	۵ nm	عموما نهشت فلز ضروری است.	[8]
مساحت سطح ویژه جرمی	جرم گاز جذب سطحی شده (مساحت سطح کل نمونه اندازه‌گیری شده را می‌دهد)	جذب سطحی گاز با استفاده از روش بت	۱ nm تا ۱ μm	چند نانومتر	به مقدار نسبتاً زیادی از نمونه (بسته به مساحت سطح ویژه مورد انتظار) نیاز دارد. به نمونه خشک و گاززدایی شده نیاز دارد.	[9]
توزیع اندازه وزن‌دهی شده حجمی (اندازه، قطر هندسی معادل است)	توزیع زاویه‌ای نور پراکنده شده	LD	۳۰ nm تا ۱ mm	۱۰ nm	تخمین کمتر تعداد نسبی ذرات زیرمیکرومتر برای نمونه‌های بس پراکنه	[10]
قطر میانگین وزن‌دهی شده حجمی	پهن‌شدگی پیک‌های پراش پرتو ایکس	XRD	۵ nm تا ۱۰۰ nm	۵ nm	برای اندازه‌گیری ساختارهای بلوری بزرگ درست‌تر است تا ساختارهای کوچک.	[11]
میانگین قطر وزن‌دهی شده حجمی نانولوله‌های کربنی	جابه‌جائی بسامد	طیف‌سنجی رامان	۰٫۵ nm تا ۲ nm	۰٫۰۵ nm	برای نانولوله‌های کربنی چنددیواره ساده نیست.	[12], [13]

یادآوری- TEM در این جدول گنجانده نشده است، زیرا آماده‌سازی نمونه برای TEM غالباً نیاز به این دارد که پودر حاوی نانواشیاء در یک مایع پراکنده‌ساز مناسب پراکنده شود. TEM در زیربندهای ۶-۳-۱۰ و ۶-۵-۱۲ مورد بحث قرار گرفته است.

۲-۴-۶ استانداردهای مرتبط

ISO 17200, Nanotechnology - Nanoparticles in powder form - Characteristics and measurements

ISO/TS 21356-1, Nanotechnologies - Structural characterization of graphene - Part 1: Graphene from powders and dispersions

ISO 26824, Particle characterization of particulate systems - Vocabulary

#### ۳-۴-۶ میکروسکوپی الکترونی روبشی

نانواشیاء و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آنها به شکل پودری را می‌توان روی پایه‌های مناسب طراحی شده برای قرارگیری در نگهدارنده آزمونه SEM، پخش کرد. روش‌های نهشت مناسب، به‌عنوان مثال استفاده از یک نوار چسب دوطرفه رسانا برای تثبیت اشیاء بر روی پایه، می‌باشد. به‌منظور دستیابی به چگالی به‌اندازه کافی کم به‌طوریکه امکان بررسی و اندازه‌گیری ذرات مجزا فراهم شود، باید به چگالی نهشت دقت شود.

روش SEM می‌تواند با برخی محدودیت‌ها، اطلاعاتی را در مورد اندازه و شکل ذرات ارائه دهد (برای جزئیات و اصول عملیات به زیربند ۳-۶-۱۲ مراجعه شود).

به‌طور خاص برای پودرها، تمایل به کلوخه شدن زمانی که روی یک بستر نهشته می‌شوند یک اشکال جدی برای تحلیل بعدی تصویر است. بنابراین، به‌دست آوردن توزیع اندازه ذرات پودرها در SEM دشوار است. با این حال، SEM برای توصیف شکل NOAA از طریق تفسیر دیداری ریزنگاشت، بسیار مفید است. به‌همین دلیل، به‌طور معمول این روش در بسیاری از محل‌های تولیدی یا تحقیقاتی NOAA استفاده می‌شود.

#### ۴-۴-۶ استانداردهای مرتبط

ISO/TS 10798, Nanotechnologies- Characterization of single-wall carbon nanotubes using scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectrometry analysis

ISO 16700, Microbeam analysis- Scanning electron microscopy- Guidelines for calibrating image magnification

#### ۵-۴-۶ جذب سطحی گاز، روش BET

روش BET شامل جذب سطحی یک تک‌لایه گاز (معمولاً نیتروژن، اگرچه کریپتون، آرگون و کربن دی‌اکسید نیز استفاده می‌شوند) روی سطح اشیاء تشکیل‌دهنده نمونه پودری است. در مورد نیتروژن، نمودار ایزوترم جذب سطحی در نقطه جوش (۷۷ K) در گستره‌ای از فشارهای جزئی نسبی، تعیین می‌شود. مقدار کل گاز جذب سطحی شده در تک‌لایه با برازش ایزوترم جذب سطحی در فرمول BET و تبدیل به دمای استاندارد ۲۷۳٫۱۵ K و فشار اتمسفر  $10^5 \times 1013$  Pa به‌دست می‌آید. از آنجاکه اندازه مولکول نیتروژن جذب شده مشخص است، مساحت سطح کل نمونه به‌دست می‌آید. سپس این مقدار با تقسیم بر جرم خشک نمونه، به مساحت سطح ویژه جرمی تبدیل می‌شود. از این اندازه‌دهی می‌توان برای مشخصه‌یابی پودرهای NOAA استفاده کرد. چنانچه چگالی مشخص باشد، با فرض یک شکل کروی برای اشیاء و اینکه اشیاء غیرمتخلخل هستند، می‌توان آن را به قطر میانگین هندسی وزن‌دهی شده جرمی نیز تبدیل کرد. اندازه‌دهی مساحت سطح ویژه جرمی و قطر میانگین هندسی وزن‌دهی شده جرمی است. یک محدودیت این روش آن است که نتیجه BET نماینده نمونه پودری است و لزوماً نماینده خود ذرات نیست.

۶-۴-۶ استانداردهای مرتبط

ISO 9277, Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption- BET method

۷-۴-۶ پراش لیزری

یک پراکنه (به عنوان مثال پودر هواسل شده) که با باریکه لیزر تحت تابش قرار می‌گیرد، در زوایا و شدت‌های مختلفی پراکنده می‌شود، بطوری که شدت‌ها به اندازه ذرات بستگی دارد. حل «مای» برای معادلات مکسول<sup>۱</sup>، پراکندگی نور به وسیله ذرات را با هر اندازه‌ای که باشند، با توجه به طول موج و ضریب‌های شکست توصیف می‌کند. درحالی که ذرات بزرگتر نور بیشتری را به سمت زوایای کمتر پراکنده می‌کنند، ذرات کوچکتر نور را به صورت ضعیف و به شکل همسانگرد پراکنده می‌کنند. بنابراین، برای ثبت الگوی پراکندگی برای محدوده وسیعی از اندازه‌ها، آشکارسازهای قرار داده شده در زوایای پراکندگی کم و زیاد در پراش لیزری استفاده می‌شوند. همچنین می‌توان از طول موج‌های لیزری چندگانه برای افزایش تشخیص اشیاء در انتهای پائینی محدوده قابل اجرا استفاده کرد که امکان اندازه‌گیری تا حدود ۱۰ nm را فراهم می‌کند. باید دقت شود که دستگاه‌های متداول LD (پراکندگی با زاویه کم) برای آنالیز نانو اشیاء در نظر گرفته نشده‌اند و عموماً به اندازه‌های بزرگتر از ۱۰۰ nm محدود می‌شوند.

در تحلیل داده‌های پراکندگی از تفاوت‌های زاویه‌ای و وابسته به طول موج استفاده می‌شود. اندازه‌ده ویژه، توزیع زاویه‌ای نور پراکنده است. با استفاده از آنالیز «مای» و با فرض یک شکل کروی برای اشیاء، این اندازه‌ده به توزیع اندازه وزن‌دهی شده حجمی تبدیل می‌شود. ضریب شکست باید مشخص باشد.

معمولاً NOAA به شکل پودری و با استفاده از یک تغذیه‌کننده ارتعاشی و به دنبال آن هوای فشرده یا شتاب خلاء در یک افشانه ونتوری<sup>۲</sup>، همراه با یا بدون برخورد، به سلول اندازه‌گیری در LD تحویل داده می‌شود. پراش لیزری اطلاعات شکل را ارائه نمی‌دهد؛ همه اندازه‌ها به صورت قطرهای کروی معادل ارائه می‌شوند. از این رو، مانند بسیاری دیگر از روش‌ها که از یک مدل کروی استفاده می‌کنند، عدم قطعیت‌ها برای اشیاء غیر کروی افزایش می‌یابد. گستره اندازه قابل اجرا به پیکربندی نوری بستگی دارد، اما می‌تواند از ده‌ها نانومتر تا تقریباً ۱ mm متغیر باشد. در یک نمونه بس پراکنه، مقدار نسبی ذرات زیر میکرومتری ممکن است کمتر از مقدار واقعی برآورد شود. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری اندازه پودرها را می‌توان به شکل مایع، از طریق پراکنش در یک بستر مایع مناسب و معمولاً به دنبال عملیات فراصوت برای جلوگیری از کلوخه شدن ذرات، انجام داد. به منظور حفظ سطح یکسانی از کلوخگی با شکل پودری خشک، لازم است به بهینه‌سازی زمان و انرژی عملیات فراصوت دقت شود. سپس می‌توان روش‌های شرح داده شده در زیر بند ۶-۵ را به کار برد.

۸-۴-۶ استانداردهای مرتبط

ISO 13320, Particle size analysis - Laser diffraction methods

1- Maxwell's equations

2- Venturi nozzle

#### ۹-۴-۶ پراش پرتو ایکس

پراش پرتو ایکس روش اصلی برای مشخصه‌یابی ساختار بلوری مواد است. شرح این روش و اطلاعات افزوده‌ای در مورد آماده‌سازی نمونه، کاربردها، مزایا و محدودیت‌ها در زیربند ۷-۲-۱۰ ارائه شده است. روش XRD همچنین می‌تواند اطلاعاتی در مورد قطر میانگین وزن‌دهی شده حجمی حوزه‌های بلوری اولیه ارائه دهد. نانوشیاء تک‌بلوری فقط یک حوزه بلوری دارند، بنابراین اندازه بلورک اندازه‌گیری شده در XRD با ابعاد نانوشیء متناظر است. در مورد نانوشیاء چندبلوری، اندازه اندازه‌گیری شده، کوچکتر از اندازه بیرونی نانوشیء است.

این اطلاعات در مورد اندازه بلورک از پهن‌شدگی پیک‌های پراش پرتو ایکس تولیدشده به‌وسیله نمونه به‌دست می‌آید. از آنجاکه پروفایل دستگاهی، میکروتنش‌ها و بی‌نظمی‌های موضعی بر روی پهن‌شدگی پیک تأثیر دارند، آنها نیز باید در نظر گرفته شوند. این پهن‌شدگی زمانی اتفاق می‌افتد که حوزه‌های بلوری کوچکتر از حدود ۱۰۰ nm باشند. در مورد مواد بلوری ناهمسانگرد، پهن‌شدگی قله‌های پراش پرتو ایکس به ابعاد بلورها در جهت متعامد به صفحات اتمی که پیک را ایجاد می‌کنند، بستگی دارد.

#### ۱۰-۴-۶ استانداردهای مرتبط

استاندارد ملی ایران شماره ۱-۲۲۹۳۸: سال ۱۳۹۹، آزمون غیرمخرب- پراش پرتو ایکس (XRD) از مواد چندبلوری و بی‌شکل - قسمت ۱: اصول کلی

استاندارد ملی ایران شماره ۲-۲۲۹۳۸: سال ۱۳۹۹، آزمون غیرمخرب- پراش پرتو ایکس (XRD) از مواد چندبلوری و بی‌شکل - قسمت ۲: روش‌های اجرایی

EN 13925-3:2005, Non-destructive testing- X-ray diffraction from polycrystalline and amorphous materials – Instruments

#### ۱۱-۴-۶ طیف‌سنجی رامان

طیف‌سنجی رامان معمولاً برای آنالیز شیمیایی استفاده می‌شود. با این حال، می‌توان از آن در موارد خاصی، به‌عنوان مثال در نانولوله‌های کربنی یا ضخامت لایه پرک‌های گرافن، برای تعیین اندازه استفاده کرد. اثر رامان، پراکندگی غیرکشسان نور با تغییر بسامد، به دلیل انتقال انرژی بین نمونه و نور فرودی می‌باشد. این جابه‌جائی بسامد اطلاعاتی در مورد حالت‌های ارتعاشی در یک مولکول (یا در مورد نانولوله‌های کربنی، یک مجموعه مولکولی خاص) می‌دهد.

در مورد نانولوله‌های کربنی، یک حالت ارتعاشی خاص، "RBM" متناظر با انبساط شعاعی حلقوی و انقباض لوله تحت برانگیختگی با نور است. بسامد این حالت با قطر نانولوله نسبت عکس دارد.

۵-۶ اندازه‌دهی‌های مربوط به اندازه‌گیری اندازه و شکل نانوشیاء در پراکنه‌های مایع

۱-۵-۶ مرور کلی

جدول ۴ خلاصه‌ای از اندازه‌دهی‌ها و روش‌های مورد استفاده برای تعیین اندازه و شکل نانوشیاء در مایعات را ارائه می‌دهد.

جدول ۴- اندازه‌دهی‌های مربوط به اندازه‌گیری اندازه و شکل در مایعات

اندازه‌دهی نهایی	اندازه‌دهی ویژه هر روش	روش	گستره اندازه	تفکیک پذیری	محدودیت‌ها	مراجع
توزیع اندازه وزن‌دهی شده جرمی (اندازه) معادل قطر هیدرودینامیکی)	قطر استوکس در CLS (قطر) هیدرودینامیکی معادل براساس سرعت ته‌نشینی اشیاء در یک محیط معلق)	CLS	۲۰ nm تا ۱ μm	۵ nm	برای افزایشی که از آشکارسازهای جذب پرتو ایکس استفاده می‌کنند، غلظت‌های نسبی بالا ( $g/l <$ ) مورد نیاز است. به چگالی موثر و ضریب شکست معین ذرات نیاز دارد.	[14]
توزیع اندازه وزن‌دهی شده حجمی (اندازه) معادل قطر هیدرودینامیکی)	تابع خودهمبستگی نور پراکنده شده در یک زاویه معین و ضریب انتشار انتقالی	DLS	۶ nm تا ۱۰۰۰ nm	۱۰ nm	برای نمونه‌های غلیظ، رنگی یا بس‌پراکنه قابل استفاده نیست.	[14]
توزیع اندازه وزن‌دهی شده حجمی (اندازه) معادل قطر هندسی)	توزیع زاویه‌ای نور پراکنده شده	پراش لیزری	۳۰ nm تا ۱ mm	۱۰ nm	تخمین کمتر ذرات زیر میکرومتر برای نمونه‌های بس‌پراکنه	[10]
توزیع اندازه وزن‌دهی شده مربع حجم (اندازه معادل قطر هندسی)، بُعد برخال <sup>۱</sup>	توزیع زاویه‌ای پرتوهای ایکس پراکنده شده	SAXS	۱ nm تا ۱۵۰ nm	۲۰ nm	برای استخراج اندازه‌دهی‌های ویژه، باید از مدل‌های پیچیده استفاده شود. برای نمونه‌های بس‌پراکنه مناسب نیست.	[15]
توزیع اندازه هیدرودینامیکی وزن‌دهی شده عددی	ضریب نفوذ	PTA	۱۰ nm تا ۲ μm	۱۰ nm	برای نمونه‌های غلیظ یا خیلی بس‌پراکنه قابل استفاده نیست. محدوده اندازه قابل اجرا می‌تواند به نوع نمونه بستگی داشته باشد.	[16]



اندازه نهایی	اندازه و ویژه هر روش	روش	گستره اندازه	تفکیک پذیری	محدودیت‌ها	مراجع
توزیع شکل و اندازه ذرات	اندازه و شکل تصویر شده دوبعدی NOAA. توزیع‌های شکل و اندازه هندسی وزن‌دهی شده عددی	SEM	۵ nm تا ۱ mm	۵ nm	نیاز به آماده‌سازی نمونه بر روی بستری دارد. اندازه‌گیری آهسته و مجزا ذرات	
اندازه و جرم مولی ذرات	توزیع زاویه‌ای نور پراکنده شده، تابع خودهمبستگی نور پراکنده شده در یک زاویه ثابت، جذب UV-Vis در یک یا چند طول موج.	FFF شامل جریان نامتقارن و گریز از مرکز	۱ nm تا $\approx 50 \mu\text{m}$	بسته به آشکارساز(های) مورد استفاده، معمولاً ۱ nm	نیاز به توسعه و اعتبارسنجی روش دارد. زمان طولانی آنالیز برای نمونه‌های بس پراکنه (بیش از یک ساعت)	[17], [18]
توزیع اندازه ذرات وزن‌دهی شده عددی	قطر معادل کروی از جرم اندازه‌گیری شده سنجیدنی و چگالی فرضی ذرات	sp-ICP-MS	۱۰ nm تا $2 \mu\text{m}$	۱۰ nm	به رقت مناسب نیاز دارد (به‌طور مستقیم برای غلظت عددی بالا قابل استفاده نیست). به چگالی و شکل مشخص ذرات نیاز دارد.	[19]

#### ۲-۵-۶ ته‌نشینی مرکزگریز مایع

ته‌نشینی مرکزگریز مایع، روشی است که براساس اندازه‌گیری نرخ ته‌نشینی (اندازه ویژه) اشیاء پراکنده در یک سیال است. این سرعت ته‌نشینی به قطر و چگالی موثر اشیاء مرتبط است. چگالی و گرانشی سیال وابسته به دما نیز باید مشخص باشد. ته‌نشینی مرکزگریز دیسکی<sup>۱</sup> پرکاربردترین نوع این روش است. به‌طور معمول، یک گرادیان چگالی ساکارز با برهم‌گذاری ملایم غلظت‌های پایین‌تر ساکارز در غلظت‌های بالاتر در یک دیسک سانتریفیوژ، ایجاد می‌شود. از سوی دیگر، همزن‌های گرادیان یا گرادیان‌سازها می‌توانند برای تشکیل یک گرادیان استفاده شوند. پراکنه رقیق حاوی ذرات موردنظر در بالای گرادیان تزریق شده و با نیروهای مرکزگریز نسبی بیش از ۱۵۰۰۰۰ سانتریفیوژ می‌شود. چرخش پرسرعت دیسک باعث جدایش شعاعی اشیاء با توجه به اندازه و چگالی آنها می‌شود. یک آشکارساز کدوری نوری یا پرتو ایکس به‌طور مداوم تضعیف نور یا غلظت جرمی را در یک موقعیت شعاعی معین در طول دیسک ثبت می‌کند. زمان ته‌نشینی اندازه‌گیری شده با استفاده از قانون استوکس به قطر معادل مربوط می‌شود. PSDs به‌دست آمده یا خاموشی نوری وزن‌دهی شده<sup>۲</sup> (آشکارساز کدوری) یا وزن‌دهی شده جرمی (آشکارساز پرتو ایکس) هستند. PSD خاموشی نوری وزن‌دهی شده را می‌توان با استفاده از تئوری «مای» به توزیع وزن‌دهی شده حجمی و در نهایت به توزیع اندازه وزن‌دهی شده عددی تبدیل کرد. در این صورت، ضریب شکست ماده، از جمله قسمت فرضی آن، باید مشخص باشد.

1- Disc centrifuge sedimentation

2- Light extinction-weighted

محدوده اندازه قابل‌اعمال حدود ۲۰ nm تا ۱۰۰۰ nm است که به چگالی نسبی ذرات و مایع پراکنده‌ساز بستگی دارد. تشخیص پرتو ایکس عمدتاً برای ذرات معدنی مناسب است. برای به‌دست آوردن خاموشی پرتو ایکس کافی، غلظت پراکنش نسبی بالا (بسته به ماهیت مواد پراکنده‌شده معمولاً در محدوده ۱۰ g/l تا ۱۰۰ g/l) موردنیاز است.

#### ۳-۵-۶ استانداردهای مرتبط

ISO 13318-1, Determination of particle size distribution by centrifugal liquid sedimentation methods - Part 1: General principles and guidelines

ISO 13318-2, Determination of particle size distribution by centrifugal liquid sedimentation methods - Part 2: Photocentrifuge method

ISO 13318-3, Determination of particle size distribution by centrifugal liquid sedimentation methods- Part 3: Centrifugal X-ray method

#### ۴-۵-۶ پراکندگی پویای نور

در یک مایع، حرکت براونی اشیاء پراکنده‌شده منجر به افت‌وخیز وابسته به زمان نور پراکنده‌شده می‌شود که به دلیل تداخل سازنده و مخرب تصادفی‌شده است. در DLS، این افت‌وخیزهای سریع با استفاده از طیف‌سنجی خودهمبستگی (حوزه زمانی) یا تحلیل بسامد (حوزه طیفی) اندازه‌گیری و تحلیل می‌شوند. اجسام بزرگتر آهسته‌تر از اجسام کوچکتر حرکت کرده و بنابراین حرکت براونی کندتری را نشان می‌دهند که با ضریب نفوذ کوچکتر مشخصه‌یابی می‌شود. از این‌رو، تعیین تابع خودهمبستگی یا طیف توان نور پراکنده‌شده در یک زاویه معین (اندازه‌ده ویژه)، امکان تعیین توزیع ضرایب نفوذ اشیاء پراکنده‌شده را فراهم می‌کند. ضریب نفوذ متوسط با استفاده از معادله استوکس-انیشیتین به قطر هیدرودینامیکی متوسط تبدیل می‌شود. این روش مستلزم آن است که دما و گرانش پویای محیط پراکنده‌ساز مشخص باشد. لازم به ذکر است که در این آنالیز، اشیاء کروی فرض می‌شوند، بنابراین عدم قطعیت‌های اندازه‌گیری می‌تواند برای نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری اشیاء غیرکروی به‌طور قابل‌توجهی افزایش یابد. با در نظر گرفتن همه این ملاحظات، یک میانگین اندازه هماهنگ وزن‌دهی‌شده شدت نور پراکنده (که اغلب به‌عنوان متوسط  $Z$  نامیده می‌شود) و شاخص بس‌پراکندگی (واریانس نسبی (وردایی نسبی) از طریق آنالیز تجمع‌کننده‌های مشخص، به‌دست می‌آیند. علاوه‌براین و با توجه به شرایط غیرعادی، یک توزیع اندازه وزن‌دهی‌شده شدت نور پراکنده را می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های رایج از قبیل حداقل مربعات نامنفی<sup>۱</sup> تولید کرد که سپس می‌تواند با استفاده از ضریب شکست مشخص پراکنده‌سازها به توزیع اندازه وزن‌دهی‌شده حجمی تبدیل شود. بس‌پراکندگی در یک نمونه می‌تواند منجر به تخمین کمتر کوچکترین اشیاء شود، زیرا سیگنال کم نور پراکنده‌شده آنها به‌وسیله سیگنال بسیار بزرگتر ناشی از اشیاء با جرم بیشتر پوشانده می‌شود و شدت پراکندگی متناسب با قطر جسم به توان شش است. به‌طور کلی، DLS برای نمونه‌های بس‌پراکنه مناسب

1- Non-negative least squares

نیست. معمولاً DLS به نمونه‌های غیرجاذب محدود می‌شود، اگرچه ذرات جاذب را می‌توان تا زمانی که پراکندگی کافی وجود داشته باشد، اندازه‌گیری کرد. این روش برای غلظت‌های بالا به دلیل اثرات پراکندگی نور چندگانه قابل استفاده نیست، اگرچه پراکندگی چندگانه را می‌توان با استفاده از سل‌های ویژه، با تمرکز در نقطه‌ای کم‌عمق در سل یا با استفاده از DLS همبستگی متقاطع، کاهش داد. محدوده اندازه تقریباً از ۶ nm تا ۱۰۰۰ nm است.

#### ۵-۵-۶ استانداردهای مرتبط

ISO 21501-2, Determination of particle size distribution- Single particle light interaction methods- Part 2: Light scattering liquid-borne particle counter

ISO 22412, Particle size analysis- Dynamic light scattering (DLS)

ISO/TR 22814, Good practice for dynamic light scattering (DLS) measurements

ASTM E2490-09, Standard guide for measurement of particle size distribution of nanomaterials in suspension by Photon Correlation Spectroscopy (PCS) [20]

ASTM E3247-20, Standard Test Method for Measuring the Size of Nanoparticles in Aqueous Media Using Dynamic Light Scattering [21]

#### ۶-۵-۶ پراش لیزری

روش پراش لیزری که در زیربند ۶-۴-۷ برای پودرها توضیح داده شده است، همچنین امکان مشخصه‌یابی توزیع‌های اندازه ذره برای پراکنش‌های مایع را فراهم می‌کند. آماده‌سازی ساده نمونه (پراکنش NOAA در یک محلول آبی، گاهی اوقات با کمک عملیات فراصوت یا عوامل فعال-سطحی، یا هر دو) در محدوده غلظت ۰٫۱ g/l تا ۱ g/l، امکان به‌دست آوردن توزیع اندازه وزن‌دهی شده حجمی را برای NOAA، فراهم می‌کند. در اینجا نیز مزایا و محدودیت‌ها مانند پودرها هستند (به ۶-۴-۷ مراجعه شود).

#### ۷-۵-۶ استانداردهای مرتبط

ISO 13320, Particle size analysis- Laser diffraction methods

#### ۸-۵-۶ پراکندگی پرتو ایکس زاویه کوچک

روش SAXS از تابش سنکروترون یا منابع پرتو ایکس تجاری در مقیاس آزمایشگاهی استفاده می‌کند. اساس روش مانند پراش لیزر است، با این تفاوت که در SAXS شدت پراکندگی با مجذور اختلاف چگالی الکترون در ذرات و محیط اطراف آنها، متناسب (به‌طور ذاتی وزن‌شده) است. طول موج بسیار کوچک پرتو ایکس امکان دسترسی به ابعاد فیزیکی و کلوخه‌ها را می‌دهد یا در موارد مطلوب (وجود حوزه برخال در یک محدوده اندازه معین)، اطلاعات ساختار سطح در گستره نانومتری را فراهم می‌کند.

اندازه‌دهی ویژه، توزیع زاویه‌ای پرتوهای ایکس پراکنده‌شده برای یک طول موج مشخص پرتو ایکس است. اندازه‌دهی نهایی عبارتند از توزیع اندازه وزن‌دهی شده حجمی ذرات عنصری، مساحت سطح کل آنها در

واحد حجم نمونه، توان برخال انبوهه‌های برخال و در برخی موارد، اندازه میانگین کلوخه‌ها. همه این اندازه‌ده‌ها با برازش مدل‌های مناسب برای منحنی شدت پراکندگی تجربی، که به‌عنوان تابعی از زاویه پراکندگی اندازه‌گیری می‌شوند، در حالی که از یک طول موج مشخص پرتو ایکس استفاده می‌کنند، به‌دست می‌آیند.

#### ۹-۵-۶ استانداردهای مرتبط

ISO 17867, Particle size analysis- Small angle X-ray scattering (SAXS)

#### ۱۰-۵-۶ آنالیز ردیابی ذرات<sup>۱</sup>

روش PTA از یک میکروسکوپ نوری با باریکه لیزر استفاده می‌کند. نور پراکنده‌شده از هر ذره به‌وسیله دوربین CCD آشکارسازی می‌شود. حرکت هر ذره از یک فریم<sup>۲</sup> به فریم دیگر به‌وسیله نرم‌افزار تحلیل تصویر، ردیابی می‌شود. حرکت براونی هر ذره (اندازه ویژه)، مربوط به قطر هیدرودینامیکی آن، ثبت می‌شود. بنابراین، توزیع اندازه هیدرودینامیکی وزن‌دهی شده عددی به‌دست می‌آید.

گرانروی محیط پراکنش باید مشخص باشد. این روش برای نمونه‌های رقیق متشکل از NOAA در گستره ۱۰ nm تا ۲۰۰۰ nm کاربرد دارد. این گستره به خواص پراکندگی ذرات بستگی دارد. برای مثال، حد پایین بیان‌شده برای ذرات متشکل از مواد با ضریب شکست بالا، مانند طلا و نقره است. برای ذراتی مانند پلی‌استایرن و سیلیس که نور را بسیار ضعیف‌تر پراکنده می‌کنند، حدود پایین به ترتیب حدود ۴۰ nm و ۸۰ nm است [22]. برای نمونه‌های بس‌پراکنه، آمارهای با فراوانی بالا باید برای کاهش عدم‌قطعیت‌ها در توزیع اندازه استفاده شوند.

#### ۱۱-۵-۶ استانداردهای مرتبط

ISO 19430, Particle size analysis- Particle tracking analysis (PTA) method

ASTM E2834-12, Standard Guide for Measurement of Particle Size Distribution of Nanomaterials in Suspension by Nanoparticle Tracking Analysis (NTA) [23]

#### ۱۲-۵-۶ میکروسکوپی الکترونی

نانواشیاء پراکنده‌شده در مایعات را می‌توان با SEM یا TEM بررسی کرد. برای این منظور، بهتر است یک محیط پراکنده‌ساز مطلوب انتخاب شود تا از کلوخگی بیش از حد جلوگیری شود. برای مثال، نانواشیاء اکسید فلزی اغلب یک مشخصه آب‌دوست از خود نشان می‌دهند که ناشی از وجود گروه‌های هیدروکسیل در سطح است. در این مورد، آب یا مخلوط‌های آب و اتانول اغلب محیط‌های پراکنده‌ساز مطلوبی هستند. در مقابل، نانولوله‌های کربنی به شدت آبگریز هستند و در حلال‌های غیرقطبی بهتر پراکنده می‌شوند.

1- Particle tracking analysis

2- Frame

برای SEM، مقدار کمی از پراکنه ( $5 \mu\text{l}$  تا  $50 \mu\text{l}$ ) را می‌توان روی یک نگه‌دارنده صاف، به‌عنوان مثال یک دیسک شیشه‌ای یا بستره سیلیکونی، منتقل کرد و اجازه داد خشک شود. برای آنالیز نمونه‌های نارسانا، پوشش آنها از طریق کندوپاش فلزی برای گذر از اثرات شارژ که مانع از فرایند تصویربرداری می‌شود، ضروری است. با این حال، استفاده از ولتاژهای شتاب‌دهنده کمتر اغلب امکان تصویربرداری بدون نیاز به پوشش‌های فلزی را فراهم می‌کند. برای TEM،  $2 \mu\text{l}$  تا  $10 \mu\text{l}$  از پراکنه را می‌توان به توری TEM حاوی پوشش کربنی منتقل کرد. در مورد پراکنه‌های آبی، آب‌دوست شدن بستره‌ها، قبل از نهشت، می‌تواند یک مزیت قابل توجه باشد زیرا از کلوخگی ساختگی پس از خشک شدن (به‌عنوان مثال حین قطره‌گذاری)، جلوگیری می‌کند. این امر به راحتی با استفاده از دستگاه تخلیه تابش (پلاسمای گازی) که قادر به تثبیت بارهای الکتریکی روی نگه‌دارنده‌ها است، به دست می‌آید. پلاسمای مرطوب اکسیژن برای تمیز کردن و اکسید کردن سطح سیلیکون مورد استفاده برای نهشت، استفاده شده است. نهشت الکتروایستا بر روی بستره‌های باردار معمولاً برای جلوگیری از آلاینده‌های در حال خشک شدن استفاده می‌شود. علاوه بر استفاده از یک اکسید طبیعی با بار منفی، بستره را می‌توان به صورت شیمیایی اصلاح کرد تا بار الکتروایستایی تولید شود که مخالف بار نانواشیاء سنجیدنی است. پلی-ال-لیزین<sup>۱</sup> و آمینوسیلان‌ها<sup>۲</sup> به‌طور گسترده‌ای برای این منظور (زمانی که سنجیدنی بار منفی دارد) استفاده شده‌اند.

روش cryo-TEM تلفیقی از آماده‌سازی زم‌زایشی<sup>۳</sup> نمونه و مشاهده آن بر روی یک نگه‌دارنده نمونه اختصاصی در دمای نیتروژن مایع است. یک فیلم بسیار نازک ( $100 \text{ nm}$  تا  $500 \text{ nm}$ ) از نمونه مایع، که روی یک توری TEM آماده شده، به سرعت با انجماد در اتان یا پروپان مایع، منجمد می‌شود. در مورد پراکنه‌های آبی، سرعت خنک شدن آنقدر زیاد است که از تشکیل بلور یخ جلوگیری می‌شود. برای پراکنه‌های مبتنی بر حلال‌های آلی، باید از انجماد سریع در نیتروژن مایع استفاده شود.

سپس اشیاء به یکباره یک موقعیت ثابت خواهند داشت: بنابراین کلوخگی نمی‌تواند رخ دهد. سپس توری TEM با استفاده از نگه‌دارنده آزمونه زم‌زایشی، برای مشاهده منتقل می‌شود. این روش دارای این مزیت منحصر به فرد است که می‌تواند پراکنه‌های مایع را در حالت طبیعی خود تصویر کند، زیرا از آلاینده‌های در حال خشک شدن اجتناب می‌شود.

اندازه‌گیری‌های اندازه و شکل پراکنه‌های خشک شده در SEM و TEM یا نمونه‌های Cryo-TEM را می‌توان همانطور که قبلاً توضیح داده شد (زیربندهای ۶-۳-۱۰ و ۶-۳-۱۲) و استانداردهای مربوطه فهرست شده در ۶-۳-۱۱ و ۶-۳-۱۳ انجام داد.

---

1- Poly-l-lysine  
2- Amino-silanes  
3- Cryogenic

### ۱۳-۵-۶ جزء جزء کردن جریان با میدان<sup>۱</sup>

جزء جزء کردن جریان با میدان گروهی از روش‌های جداسازی مرتبط است که در آن جداسازی اجزای تشکیل‌دهنده نمونه حل‌شده، معلق و پراکنده‌شده در گستره اندازه ۱ nm تا تقریباً ۵۰ μm در یک کانال نازک نوآرمانند بدون فاز ثابت انجام می‌شود. روش FFF ظرفیت جزء جزء کردن جمعیت‌های متنوعی از NOAAs را با حداقل آشفتگی در نمونه ارائه می‌دهد. روش FFF یک روش ماژولار است که در آن چندین آشکارساز را می‌توان پشت سر هم مرتب کرد. به این ترتیب، اندازه ذره، غلظت، جرم مولی و ترکیب را می‌توان پس از جداسازی، برای نوارهای شستشو بر اساس یک یا چند میدان اعمال‌شده عمود بر جهت جریان، تعیین کرد. برای حفظ جریان آرام بین صفحه پایینی که تحت عنوان دیواره تجمع<sup>۲</sup> نامیده می‌شود و صفحه بالایی که به عنوان دیواره تخلیه<sup>۳</sup> شناخته می‌شود، ضخامت کانال کمتر از ۱ mm (معمولاً ۳۵۰ μm) است. بسته به میدان نیروی اعمالی، FFF را می‌توان به روش‌های فرعی مختلفی تقسیم کرد. دستگاه‌های تجاری موجود که برای آنالیز NOAAها استفاده می‌شوند عبارتند از FFF با جریان نامتقارن، FFF مرکزگرای و FFF الکتریکی (که به صورت هم‌یوگی<sup>۴</sup> با FFF جریان نامتقارن استفاده می‌شود).

برای FFF با جریان نامتقارن، سازوکار یا حالت جداسازی به اندازه ذره بستگی دارد. برای ذرات کوچکتر از حدود ۵۰۰ nm، جداسازی حالت عادی غالب است و ذرات کوچکتر قبل از ذرات بزرگتر شسته می‌شوند. از تقریباً ۵۰۰ nm تا ۱۰ μm، جداسازی حالت فضایی منجر به شستشوی ذرات به ترتیب معکوس اندازه می‌شود. بیش از تقریباً ۱۰ μm حالت بیش‌لایه<sup>۵</sup> غالب است، که همچنین منجر به شستشو با معکوس اندازه می‌شود. به‌طور معمول، برای NOAAs روش جزء جزء کردن جریان با میدان با ذرات در محدوده حالت عادی، کار می‌کند. به‌طور کلی نمی‌توان یک جزء جزء کردن را انجام داد که در آن بدون پیچیدگی‌های حالت‌های مختلط جداسازی، اندازه ذرات در هر دو گستره طبیعی و فضایی/بیش‌لایه قرار گیرد.

جزء جزء کردن جریان با میدان زمانی که برای مشخصه‌یابی نانوشی استفاده می‌شود، یک سامانه اندازه‌گیری یکپارچه است که جداسازی بالادست را با آنالیز چند آشکارساز پایین‌دست تلفیق می‌کند. مزایای FFF عبارتند از: نیاز به اندازه نسبتاً کم نمونه، توانایی تطبیق فاز متحرک با نمونه، فقدان فاز جامد (در مقایسه با کروماتوگرافی اندازه‌گزینه)، ظرفیت جداسازی نمونه‌های بس‌پراکنه برای آنالیز اندازه با تفکیک‌پذیری بالا یا برای آنالیز برون‌خط با بسیاری از روش‌ها و وجود گستره وسیعی از آشکارسازهای برخط در دسترس.

رایج‌ترین آشکارسازهای مربوط به آنالیز NOAAs عبارتند از DLS، MALS و جذب UV-Vis. در یک حالت ایده‌آل، تعیین قطر ذرات بر اساس زمان ماند<sup>۶</sup> و استفاده از نظریه FFF خواهد بود. اگرچه روش‌های اندازه‌گیری محدودیت‌هایی را از نظر گستره قابل تشخیص اندازه و غلظت دارند، با این حال، از آنجایی که

- 
- 1- Field flow fractionation
  - 2- Accumulation wall
  - 3- Depletion wall
  - 4- In conjugation
  - 5- Hyperlayer
  - 6- Retention time

جداسازی FFF اغلب تحت تأثیر برهم‌کنش‌های بین ذرات و غشایی است که در بالای دیواره تجمع قرار دارد، اندازه‌گیری مستقیم اندازه به اندازه‌گیری اندازه مبتنی بر ماند ترجیح داده می‌شود. روش FFF، هنگامی که با DLS و MALS همراه شود، همچنین می‌تواند برخی از اطلاعات شکل، به‌عنوان مثال اندازه‌گیری نسبت منظری میله، را ارائه دهد.

برای اندازه‌گیری‌های برخط غلظت، جذب UV-Vis، آشکارساز ضریب شکست و ICP-MS رایج‌ترین موارد در سامانه‌های FFF هستند. این روش‌ها عموماً به جرم سنجیدنی موجود حساس هستند. از آنجایی که ICP-MS یک روش مخرب است، از آن به‌عنوان آشکارساز نهایی در آنالیز پی‌اچ استفاده می‌شود. روش‌های مبتنی بر ICP-MS حد تشخیص‌های بسیار پایینی دارند (بسته به دستگاه و عنصر تقریباً تا رژیم ng/l) و برای نانوآشیاء حاوی فلز، خاص عنصری هستند. در مقایسه با روش‌های ICP-MS، حد تشخیص‌های UV-Vis به خواص جذب شونده‌گی و پراکندگی مواد بستگی داشته و به عنصر خاصی بستگی ندارد روش UV-Vis برای مواد فعال نوری که نوار جذب مشخصی دارند یا در جایی که فقط یک گونه جذب‌کننده منفرد وجود داشته باشد، بهترین کارایی را دارد. خطی بودن جذب باید برای سنجیدنی در محدوده غلظت مربوطه تایید شود. برخلاف آنالیز برخط، روش‌های اجرائی آنالیز برون‌خط (اندازه‌دهی و ارزشیابی غلظت پس از جمع‌آوری جزءها پس از جداسازی) امکان استفاده از روش‌های تشخیص اضافی مانند میکروسکوپی الکترونی و میکروسکوپی نیروی اتمی را فراهم می‌سازند. اگرچه نتایج آنالیز میکروسکوپی به روش‌های آماده‌سازی نمونه بستگی دارد، اطلاعات دیداری‌سازی شده می‌توانند برای مشخصه‌یابی NOAAs مفید باشند.

در نهایت، با استفاده از یک شکست‌سنج<sup>۱</sup> تفاضلی با اندازه‌گیری تغییر افزایشی در ضریب شکست با توجه به تغییر غلظت و تلفیق آن با نتایج MALS با استفاده از روابط به‌خوبی تثبیت شده، می‌توان جرم مولی را برای نانوآشیاء بسپاری به‌دست آورد.

#### ۱۴-۵-۶ استانداردهای مرتبط

ISO/TS 21362, Nanotechnologies - Analysis of nano-objects using asymmetrical-flow and centrifugal field-flow fractionation

#### ۱۵-۵-۶ ICP-MS تک‌ذره

روش sp-ICP-MS می‌تواند به‌طور هم‌زمان اطلاعاتی در مورد اندازه، توزیع اندازه، غلظت عددی ذرات و محتوای یونی برای آنالیز تعلیق‌های بسیار رقیق نانوذرات ارائه دهد. روش ICP-MS تک‌ذره بر این اصل متکی است که در هر زمان، یک نانوذره آشکارسازی می‌شود. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از دوره‌های اندازه‌گیری کوتاه متوالی (میکروثانیه تا میلی‌ثانیه)، انجام می‌شوند. هر نانوذره در پلاسما، اتمی و یونیزه می‌شود و یک بسته متمرکز فضایی از یون‌ها تولید می‌کند که به‌عنوان یک سیگنال خیزه‌ای گذرا<sup>۲</sup> که روی سیگنال حالت

1- Refractometer  
2- Transient signal spike

پایدار تولید شده به وسیله هر سنجیدنی حل شده سوار شده و اندازه گیری می شود. شدت سیگنال گذرا از یک ذره منفرد، پس از تفریق شدت سیگنال زمینه<sup>۱</sup>، متناسب با تعداد اتم های ذره است که می تواند به جرم عنصر و در نتیجه قطر به توان سوم، با فرض شکل کروی ذرات، تبدیل شود. چگالی و شکل ذرات باید مشخص باشد. تعداد تپ های شمارش شده متناسب با غلظت عددی نانوذرات است. شدت سیگنال پیوسته معیاری از سنجیدنی حل شده را ارائه می دهد. ابزارهای شمارش خودکار برای افزایش کارایی و درستی زمان توسعه یافته اند.

حدود تشخیص به ترکیب عنصری، چگالی ذرات، محتوای سنجیدنی حل شده و حساسیت دستگاه تجاری مورد استفاده، بستگی دارند. برای نانوذرات شیمیایی همگن متشکل از یک عنصر تک ایزوتوپی (به عنوان مثال طلا) و حاوی غلظت جرمی کم از یون ها، حدود تشخیص اندازه ۱۰ nm را می توان به دست آورد. گستره اندازه بالایی برای ذرات اکسید فلزی با چگالی کم می تواند به ۲۰۰۰ nm برسد. غلظت های عددی در محدوده ۱۰<sup>۳</sup> در میلی لیتر تا ۱۰<sup>۵</sup> در میلی لیتر قابل اندازه گیری هستند. غلظت های یونی در سطوح قسمت در تریلیون در نمونه رقیق شده قابل اندازه گیری هستند.

#### ۶-۵-۱۶ استانداردهای مرتبط

ISO/TS 19590, Nanotechnologies- Size distribution and concentration of inorganic nanoparticles in aqueous media via single particle inductively coupled plasma mass spectrometry

#### ۶-۶ اندازه ده های مربوط به اندازه گیری اندازه و شکل روی سطوح (روش های میکروسکوپی)

#### ۱-۶-۶ مرور کلی

جدول ۵ خلاصه ای از اندازه ده ها و روش های مورداستفاده برای تعیین اندازه و شکل نانو اشیاء را زمانی که نانو اشیاء روی یک سطح قرار گرفته باشند، ارائه می کند.



جدول ۵- اندازه‌دهی‌های مربوط به اندازه‌گیری اندازه و شکل روی سطوح

اندازه نهایی	اندازه‌ده ویژه هر روش	روش	گستره اندازه	تفکیک پذیری	محدودیت‌ها	مراجع
اندازه و شکل NOAA	شکل و اندازه تصویر شده دوبعدی NOAA. توزیع شکل و اندازه هندسی وزن‌دهی شده عددی	SEM	۵ nm تا ۱ mm	۵ nm	نیاز به آماده‌سازی نمونه روی بستره دارد. روش کند، اندازه‌گیری ذرات مجزا	
نقشه سه‌بعدی توپوگرافی سطح	نیروی تماسی برای دستیابی به شکل و اندازه سه‌بعدی	AFM	۱ nm تا ۱۰۰۰ nm	۰/۱ nm	از ارتفاع (Z) ذرات به عنوان تفکیک پذیری محدود شده به وسیله اندازه پروب در جهات X و Y استفاده می‌کند.	[24]

#### ۲-۶-۶ میکروسکوپی الکترونی روبشی

نانواشیاء را می‌توان به راحتی در SEM بررسی کرد. یک قطعه کوچک از ماده که سطح را نشان می‌دهد، با استفاده از خمیر رسانا روی نگهدارنده مناسب SEM نصب می‌شود. برای مشاهده در SEM کلاسیک (خلاء بالا)، ممکن است نیاز باشد که سطح نمونه با کندوپاش فلز در یک پوشش‌دهنده خلاء رسانا شود، اگرچه ممکن است این امر با دستگاه‌های جدیدی که می‌توانند در ولتاژهای شتاب‌دهنده پایین و در نتیجه شارژ شدن کمتری کار کنند، ضروری نباشد. با این حال، خواص ویژه نمونه (مانند مقدار زیاد آب جذب سطحی شده) می‌تواند حتی پس از کندوپاش فلز منجر به رسانایی ضعیف شود. SEM با خلاء کم به دلیل طراحی خاص آشکارساز الکترون پس‌پراکنده<sup>۱</sup>، امکان مشاهده بدون نیاز به این آماده‌سازی را فراهم می‌کند.

تحلیل تصویر در صورتی امکان‌پذیر است که اندازه اشیاء با تفکیک‌پذیری عرضی دستگاه سازگار باشد. زبری سطح باید بسیار کم باشد، در غیر این صورت افت‌وخیزهای تباین موضعی ناشی از توپوگرافی می‌تواند مانع از تشخیص اشیاء براساس تحلیل سطح خاکستری تصویر شود. غلظت سطح باید بسیار کمتر از آستانه نفوذ جریان<sup>۲</sup> باشد تا امکان شناسایی اشیاء مجزا فراهم شود.

#### ۳-۶-۶ میکروسکوپی نیروی اتمی

سطح نمونه به صورت یک طرح شطرنجی مستطیل‌شکل به وسیله نوک بسیار تیز (معمولاً از جنس سیلیکون، با شعاع انحنای حدود ۵ nm تا ۱۰ nm) روبش می‌شود. اجزای پیزوالکتریک برای حرکت یک سوزن که روی یک تیرک<sup>۳</sup> سوار شده است در جهات X، Y و Z نسبت به نمونه، استفاده می‌شوند. در نزدیکی سطح، سوزن

1- Backscattered electron  
2- Percolation  
3- Cantilever

نیروهای مختلفی را تجربه می‌کند که عموماً از طریق انحراف تیرک که با استفاده از یک باریکه لیزر متصل به یک آشکارساز نوری پایش می‌شود، تشخیص داده می‌شود. در حالت تماسی نیروی ثابت، کل نیروی وارد شده به سوزن، با تنظیم ارتفاع Z سوزن نسبت به نمونه، در سطح ثابتی حفظ می‌شود. این سیگنال بازخورد باعث تولید اندازه‌دهی نهایی به صورت یک تصویر توپوگرافی از سطح می‌شود. بنابراین اندازه‌دهی ویژه این روش، یک نیروی تماسی (به عنوان مثال واندروالس یا الکتروایستا) است که به انحراف باریکه لیزر و در نهایت به یک نقشه سه‌بعدی از سطح تبدیل می‌شود.

در حالت تماسی، سوزن تمایل دارد تحت تأثیر نیروهای جاذبه ایجاد شده از لایه‌های مایع جذب سطحی شده، به سطح بسیاری از مواد بچسبد یا به سطح آن‌ها آسیب برساند. حالت تماس متناوب با نوسان کردن تیرک در راستای Z، به گونه‌ای که سوزن پروب با سطح نمونه برای کسری از نوسان سینوسی تماس برقرار کند، از این آسیب رساندن جلوگیری می‌کند. در این حالت، می‌توان از تغییر دامنه ناشی از تماس متناوب برای کنترل ارتفاع نسبی نمونه و سوزن در تصویر روبش شده منتهی به تصویر توپوگرافی، استفاده کرد. از این رو، AFM می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد اطلاعات شکل سه‌بعدی، برای مثال برای نانومیله‌ها و مواد دوبعدی که ضخامت و اندازه عرضی آن‌ها را می‌توان اندازه‌گیری کرد، ارائه دهد.

#### ۴-۶-۶ استانداردهای مرتبط

ISO 11775, Surface chemical analysis - Scanning-probe microscopy - Determination of cantilever normal spring constants

ISO 11952, Surface chemical analysis - Scanning-probe microscopy - Determination of geometric quantities using SPM: Calibration of measuring systems

ISO 13095, Surface Chemical Analysis - Atomic force microscopy - Procedure for in situ characterization of AFM probe shank profile used for nanostructure measurement

ASTM E2859-11, Standard Guide for Size Measurement of Nanoparticles Using Atomic Force Microscopy [25]

#### ۷ اندازه‌دهی‌های مربوط به آنالیز شیمیایی نانواشیاء و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آن‌ها

##### ۱-۷ کلیات

مشخصه‌یابی ترکیب شیمیایی نانواشیاء از این جهت که اطلاعاتی را درباره طبیعت شیمیایی اجزاء، افزودنی‌ها، محل قرارگیری گونه‌های شیمیایی و حالت‌های شیمیایی سطح فراهم می‌کند، مهم است. چنین مشخصه‌یابی گاهی اوقات برای نانواشیاء مجزا و گاهی برای گروهی از آنها و یا کل مجموعه، به عنوان مثال نانواشیاء به همراه یک بستره، انجام می‌شود. برخی از اندازه‌گیری‌ها همچنین می‌توانند به بررسی آلودگی نانواشیاء و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آنها مانند اجزای آلی باقی‌مانده (از آماده‌سازی اولیه) یا آلودگی فلزی، کمک کنند. برخی از اطلاعات را می‌توان برای اجزای فرار به کمک مطالعات آنالیزهای گرمایی و با شناسایی گازهای ایجاد شده در طول حرارت‌دهی (مانند روش EGA) تعیین کرد. روش‌های توضیح داده شده در بند ۷

به‌طور ویژه برای استفاده نانوآشپاء طراحی نشده‌اند و معمولاً تفکیک‌پذیری در حد مقیاس نانو ندارند، اما می‌توانند اطلاعات بسیار ارزشمندی را درباره آنها ارائه کنند.

فرایند مشخصه‌یابی نانوآشپاء باید احتمال ساختار پیچیده آنها را نیز در نظر بگیرد. چنین ساختارهایی (به عنوان مثال ساختار هسته-پوسته یا مولکول‌های سطحی پیچیده) به روش‌های مشخصه‌یابی نیاز دارند که اطلاعات تفصیلی در مورد اجزاء فعال شیمیایی ارائه دهند. علاوه بر این، توسعه نانوچندسازه‌ها مستلزم آگاهی از خواص شیمیایی ساختار هسته-پوسته است. خواص مواد نانوچندسازه‌ای حاوی نانوپرکننده‌ها می‌تواند به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر نسبت اختلاط زمینه آلی و نانوپرکننده‌ها<sup>۱</sup> قرار گیرد. برای این منظور، درجهٔ پراکنش در سراسر نمونه موردنیاز است.

فرایند ساخت نانوآشپاء می‌تواند مواد را آلوده کند. روش‌های اندازه‌دهی مربوط به آنالیز شیمیایی توصیف‌شده در بند ۷ می‌تواند برای تشخیص انواع مختلف آلودگی نانوآشپاء مفید باشد. این روش‌ها می‌توانند به شناسایی ناخالصی‌های موجود روی سطح نانوآشپاء یا در محلول کمک کنند.

بسیاری از انواع مختلف نانوآشپاء به شکل پراکنه آبی تهیه می‌شوند. نانوآشپاء در چنین پراکنه‌هایی می‌توانند به‌صورت ذرات اولیه، کلوخه‌ها و انبوهه‌ها وجود داشته باشند. پایداری پراکنه به تأثیر همه نیروها بستگی دارد که عمدتاً به‌وسیله خواص ذره و محیط پراکنش و خواص سطح ذرات، یعنی شیمی سطح، تعیین می‌شود.

در نظر گرفتن ارتباط اساسی عملیات سطحی یا اصلاحات نانوآشپاء مهم است. در غیراین‌صورت، بسیاری از نانوآشپاء تمایل به تشکیل کلوخه‌های بزرگ دارند و ذرات اولیه در آب پراکنده نمی‌شوند. علاوه بر این، نانوآشپاء می‌توانند با اجزای فاز مایع برهم‌کنش داشته باشند و به‌طور جزئی یا کامل باعث تخریب یا تبدیل محصولات شوند که می‌تواند بر سمیت کلی و نتیجه نهایی فرآیندها تأثیر داشته باشد.

## ۷-۲ اندازه‌دهی مربوط به آنالیز شیمیایی سطح نانوآشپاء و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آنها

### ۷-۲-۱ اندازه‌دهی

اندازه‌دهی در جدول ۶ ارائه شده‌اند و در زیربندهای بعدی با جزئیات بیشتر همراه با روش‌ها توضیح داده می‌شوند. همانطور که اندازه‌دهی کوچکتر می‌شود، سطوح کسر بزرگی از «حجم» آنالیز را تشکیل می‌دهند. آماده‌سازی نمونه و کار کردن با دقت برای کمینه کردن آلودگی و اطمینان از آنالیز صحیح، ضروری است. تفکیک‌پذیری‌های عرضی و عمقی ارائه‌شده در جدول ۶ مقادیر متداول کارکرد دستگاهی تجاری فعلی هستند.

جدول ۶- اندازه‌ده‌های مربوط به آنالیز شیمیایی سطح نانواشیاء و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آنها

مراجع	محدودیت‌ها	تفکیک پذیری عمقی روش	تفکیک پذیری عرضی روش	روش	اندازه‌ده ویژه هر روش	اندازه‌ده نهایی
[26], [27], [28], [29]	نمونه‌ها تحت خلاء بالا آنالیز می‌شوند؛ نمونه‌های غیررسانا نیاز به مراقبت دارند. حساسیت (۰/۳ درصد اتمی). اثرات زمینه در AES کمی نمونه‌های چندجزئی باید موردتوجه قرار گیرد.	۲ nm تا ۲۰ nm	۱۰ nm	AES	انرژی جنبشی الکترون‌ها (eV)	شناسایی شیمیایی
[29], [30], [31]	نیاز به آزمونه‌های بسیار نازک ( $< 30 \text{ nm}$ )، شدت ضعیف برای اتلاف انرژی $< 300 \text{ eV}$ . فقط با TEM انجام می‌شود.	۱۰ nm	۰٫۱ nm	TEM با EELS	تغییر در توزیع انرژی باریکه الکترونی عبوری از یک آزمونه نازک (eV)	ترکیب، پیوندهای شیمیایی، خواص سطحی
[29], [32], [33]	چالش‌های کمی‌سازی. نمونه‌ها تحت خلاء آنالیز می‌شوند.	$\approx 1 \text{ nm}$ (معدنی) $\approx 10 \text{ nm}$ (آلی)	۲۰۰ nm	SIMS	یکاهای جرم اتمی یک‌دست (u)	ترکیب عنصری، ایزوتوپی یا مولکولی سطح
[34], [35], [36]	حد کمی متداول: ۱۰ ppm تا ۲۰ ppm (قسمت در میلیون). همراه با منبع تابش سنکروترون، حدود آشکارسازی مطلق: ppb ۱۰۰ (قسمت در میلیارد)	۵ $\mu\text{m}$ تا ۲۰ $\mu\text{m}$	۱ nm تا ۱۰۰ $\mu\text{m}$	XRF	طیف فلورسانس (شدت) برحسب طول موج با واحد $\text{cm}^{-1}$	آنالیز شیمیایی و عنصری
[37]	برای اندازه‌گیری ساختارهای بلوری بزرگ، در مقایسه با ساختارهای کوچک‌تر، درست‌تر است.	۵ $\mu\text{m}$ تا ۲۰ $\mu\text{m}$	۵۰ $\mu\text{m}$	XRD	زوایا و شدت‌های پرتو ایکس پراشیده‌شده (شدت، درجه)	اندازه بلوری، فاز بلورشناختی، پارامترهای شبکه، ساختار
[26], [28], [29]	نمونه‌ها معمولاً تحت خلاء آنالیز می‌شوند. حساسیت (۰/۱ درصد اتمی)	$> 1 \text{ nm}$	$> 10 \mu\text{m}$	XPS	انرژی جنبشی الکترون‌ها (eV)	ترکیب سطح، شیمی پوشش، عامل‌دار شدن سطح

اندازه نهایی	اندازه ده ویژه هر روش	روش	تفکیک پذیری عرضی روش	تفکیک پذیری عمقی روش	محدودیت‌ها	مراجع
ترکیب	برهم کنش بین باریکه الکترونی و نمونه، فوتون تولید می‌کند.	EDX	۰٫۵ $\mu\text{m}$	۰٫۳ تا ۵ $\mu\text{m}$	برای EDX با استفاده از SEM باید آزمون‌ها رسانا و کاملاً صیقل داده شده باشند. ترکیب به دست آمده نسبی است.	[29], [30]
ضخامت پوشش	پراکندگی یون‌های گاز نجیب	LEIS	۰٫۱ تا ۰٫۵ mm	۱ تا ۱۰ nm	گونه‌های جذب سطحی شده روی نانواشیاء باید قبل از آنالیز حذف شوند.	[29]

### ۲-۲-۷ طیف‌سنجی الکترون اوژه

روش AES اطلاعاتی در مورد ماهیت شیمیایی مواد ارائه داده و در خلاء فوق‌العاده بالا کار می‌کند. این روش از اثر اوژه استفاده می‌کند که واپاشی غیرتابشی ناشی از برخورد الکترونی است که حفره‌ای در هسته ایجاد کرده و منجر به نشر یافتن الکترون‌های پرنرژی اوژه از یک اتم برانگیخته شده و به وسیله طیف‌سنج الکترونی آنالیز می‌شود. در طیف‌سنجی اوژه، اثرات باردار شدن در نمونه‌های نارسانا رایج‌ترین محدودیت است، اگرچه با دقت، آنالیز نانواشیاء نارسانای قرار گرفته روی یک بستر رسانا و استفاده از تفنگ الکترونی با جریان بالا، امکان‌پذیر می‌شود. این روش اطلاعات عنصری و حالت شیمیایی نیمه‌کمی ارائه می‌دهد. حساسیت سطحی در AES از این واقعیت ناشی می‌شود که الکترون‌های نشر یافته معمولاً دارای انرژی‌هایی در گستره ۵۰ eV تا ۳ keV هستند. حدود آشکارسازی تقریباً ۰٫۱ درصد اتمی تا ۱ درصد اتمی قابل‌دستیابی است و به عنصر مورد آنالیز بستگی دارد. این روش می‌تواند برای آنالیز نانوذرات مجزا یا مجموعه‌ای از نانوذرات و همچنین به دست آوردن نقشه‌های عنصری، استفاده شود.

### ۳-۲-۷ استانداردهای مرتبط

ISO/TR 14187, Surface chemical analysis- Characterization of nanostructured materials  
 ISO 15471, Surface chemical analysis- Auger electron spectroscopy- Description of selected instrumental performance parameters

ISO 16242, Surface chemical analysis- Recording and reporting data in Auger electron spectroscopy (AES)

ISO 16531, Surface chemical analysis- Depth profiling- Methods for ion beam alignment and the associated measurement of current or current density for depth profiling in AES and XPS

1- Electron flood gun

ISO 18116, Surface chemical analysis- Guidelines for preparation and mounting of specimens for analysis

ISO 18117, Surface chemical analysis- Handling of specimens prior to analysis

ISO 18118, Surface chemical analysis- Auger electron spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy- Guide to the use of experimentally determined relative sensitivity factors for the quantitative analysis of homogeneous materials

ISO 20579-4, Surface chemical analysis- Guidelines to sample handling, preparation and mounting — Part 4: Reporting information related to the history, preparation, handling and mounting of nano-objects prior to surface analysis

ISO 29081, Surface chemical analysis- Auger electron spectroscopy- Reporting of methods used for charge control and charge correction

#### ۴-۲-۷ طیف‌سنجی اتلاف انرژی الکترون

در روش EELS، یک ماده در معرض باریکه‌ای از الکترون‌ها با محدوده مشخص و باریکی از انرژی‌های جنبشی قرار می‌گیرد که باعث پراکندگی غیرکشسان برخی از الکترون‌ها می‌شود. مقدار اتلاف انرژی را می‌توان از طریق یک طیف‌سنج الکترونی اندازه‌گیری و برحسب اینکه چه عاملی باعث اتلاف انرژی شده‌است، تفسیر کرد. روش EELS درون TEM کار می‌کند و می‌توان آن را مکمل EDX در نظر گرفت، اما با قابلیت آشکارسازی ۱۰ برابر بیشتر از EDX و بسیار مناسب‌تر برای عناصری که عدد اتمی کمتر دارند. سیگنال خروجی شامل اطلاعات شیمیایی و اطلاعات مستقیمی درباره ساختار جامدات و حالت اکسایش عناصر است. روش EELS می‌تواند ترکیب اتمی، پیوندهای شیمیایی، ظرفیت و خواص الکترونی نوار هدایت را اندازه‌گیری کند. همچنین در مقایسه با EDX، تمایز بهتری را بین عناصر ارائه می‌دهد. نمونه‌ها برای بررسی با EELS در TEM نیاز به آماده‌سازی دقیق دارند و باید به‌صورت برش‌های نازکی از ماده به‌وسیله باریکه یونی متمرکز (FIB) یا فراریزبر<sup>۱</sup> تهیه شوند.

#### ۵-۲-۷ استانداردهای مرتبط

ISO/TR 14187, Surface chemical analysis- Characterization of nanostructured materials

#### ۶-۲-۷ طیف‌سنجی جرمی یون ثانویه

طیف‌سنجی جرمی یون ثانویه روشی است که در علم مواد و علم سطح برای آنالیز ترکیب (شناسایی عناصر کمیاب، مولکول‌های آلی و بسپارها روی سطوح، با حساسیت بالاتر از ۱ ppm) سطوح جامد استفاده شده و از طریق کندوپاش کردن سطح نمونه با باریکه یون اولیه متمرکز و جمع‌آوری و آنالیز یون‌های ثانویه خارج شده، انجام می‌شود. نسبت جرم به بار این یون‌های ثانویه با یک طیف‌سنج جرمی اندازه‌گیری می‌شود تا ترکیب عنصری، ایزوتوپی یا مولکولی سطح تا عمق ۱ nm تا ۲ nm تعیین شود. تفکیک‌پذیری عرضی این روش معمولاً ۲۰۰ nm است، بنابراین مجموعه‌ای از نانواشیاء آنالیز می‌شوند. بسته به ماده، برخی از تنظیمات،

1- Ultramicrotomer

اجازه تفکیک‌پذیری ۵۰ nm تا ۱۰۰ nm را هم می‌دهند. این یک روش بسیار حساس برای بررسی شیمی سطح (۱ nm بالایی) در نمونه‌هاست که در این حالت، مجموعه‌ای از نانواشیاء هستند.

#### ۷-۲-۷ استانداردهای مرتبط

ISO/TR 14187, Surface chemical analysis - Characterization of nanostructured materials

ISO 18114, Surface chemical analysis - Secondary-ion mass spectrometry - Determination of relative sensitivity factors from ion-implanted reference materials

ISO 20341, Surface chemical analysis - Secondary-ion mass spectrometry - Method for estimating depth resolution parameters with multiple delta-layer reference materials

ISO 20579-4, Surface chemical analysis - Guidelines to sample handling, preparation and mounting - Part 4: Reporting information related to the history, preparation, handling and mounting of nano-objects prior to surface analysis

ISO 22048, Surface chemical analysis - Information format for static secondary-ion mass spectrometry

ISO 23830, Surface chemical analysis - Secondary-ion mass spectrometry - Repeatability and constancy of the relative-intensity scale in static secondary-ion mass spectrometry

#### ۸-۲-۷ طیف سنجی فلورسانس پرتو ایکس

روش XRF برای آنالیز شیمیایی عنصری مواد استفاده می‌شود. یک منبع پرتو ایکس جهت تابش به نمونه استفاده می‌شود که سبب می‌شود عناصر موجود در نمونه، پرتوهای ایکس مشخصه خود را نشر (یا برانگیخته) کنند. یک سامانه آشکارسازی (پاشنده طول موج) برای اندازه‌گیری قله‌های پرتو ایکس نشر یافته به منظور اندازه‌گیری‌های کمی و کیفی عناصر و مقادیر آنها، استفاده می‌شود. این روش در دهه ۱۹۷۰ برای آنالیز فیلم‌های نازک گسترش یافت. به‌طور معمول XRF برای تعیین ترکیب عنصری فیلم استفاده می‌شود. هنگامی که مواد با تابش پراثری با طول موج کوتاه (مانند پرتو ایکس) برانگیخته شوند، می‌توانند یونیزه شوند. اگر انرژی تابش برای جابجایی یک الکترون محکم در لایه داخلی کافی باشد، اتم ناپایدار می‌شود و یک الکترون لایه بیرونی جایگزین الکترون داخلی از دست رفته می‌شود. جدا از ماهیت غیرمخرب آن، این روش چندعنصری و سریع است و در مطالعات شیمیایی انواع مختلف مواد، با موفقیت به کار می‌رود. قبل از اندازه‌گیری XRF، نیازی به هیچ‌گونه فرایند ترمیم یا پاکسازی نیست، مگر با هدف حذف مکانیکی آلودگی از سطح نمونه‌ها که تحت دیداری‌سازی میکروسکوپی انجام می‌شود. تمام آنالیزها به منظور آشکارسازی عناصر سبک در خلاء انجام می‌شود. عناصر موجود در نمونه‌ها بر اساس خطوط مشخصه پرتو ایکس شناسایی می‌شوند و می‌توانند در گستره وسیعی از عناصر، از سدیم (عدد اتمی ۱۱) تا اورانیم (عدد اتمی ۹۲) استفاده شده و حد آشکارسازی در محدوده ppm فراهم می‌کند. روش XRF یک روش سریع (ترکیبات شیمیایی در عرض چند ثانیه تعیین می‌شوند) و برای استفاده، آسان است. حجم آنالیز شده در مقایسه با هر گونه آلودگی سطحی بسیار زیاد است. مواد مرجع برای کالیبراسیون مورد نیاز است. علیرغم این واقعیت که این روش

دارای تفکیک‌پذیری عرضی تقریباً ۱۰۰ نانومتر است، می‌توان از آن برای شناسایی شیمیایی نانوآشیاء و مواد حاوی آنها استفاده کرد [30]، [31]، [32].

فلورسانس بازتاب کلی پرتو ایکس (TXRF) شبیه به روش XRF پاشنده انرژی است، اما در هندسه تنظیم‌شده کار می‌کند. در اینجا، یک پرتو فرودی با زاویه‌ای کمتر از زاویه بحرانی بازتاب خارجی کل برای پرتو ایکس، به یک نمونه برخورد می‌کند که باعث بازتاب تقریباً ۱۰۰٪ فوتون‌های پرتو تحریک می‌شود. مزیت این روش کاهش سهم پس‌زمینه اندازه‌گیری با حذف پراکندگی ناشی از نمونه و در نتیجه افزایش حساسیت اندازه‌گیری عنصری است. روش TXRF همچنین یک روش کاملاً پذیرفته‌شده برای آنالیز شیمیایی است و عمدتاً برای کنترل کیفیت صنایع الکترونیکی استفاده می‌شود. با توجه به حساسیت بالا نسبت به آشکارسازی فلزات سنگین، روش TXRF برای اندازه‌شناسی شیمیایی زیست‌محیطی در مقیاس نانو مناسب است. با توجه به استانداردهای مناسب، روش TXRF را می‌توان به عنوان یک آنالیز متداول کمی در زمینه‌های محیط‌زیستی در آینده در نظر گرفت. علاوه بر این، گسترش روش TXRF به منظور اندازه‌گیری وابستگی سیگنال فلورسانس به زاویه، باعث افزایش توجه به آنالیز لایه نازکی از نانوذرات شده است.

#### ۹-۲-۷ استانداردهای مرتبط

ISO 14706, Surface chemical analysis - Determination of surface elemental contamination on silicon wafers by total-reflection X-ray fluorescence (TXRF) spectroscopy

ISO/TS 18507, Surface chemical analysis - Use of total reflection X-ray fluorescence spectroscopy in biological and environmental analysis

#### ۱۰-۲-۷ پراش پرتو ایکس

پراش پرتو ایکس روشی است برای تعیین ساختار اتمی و مولکولی یک بلور که در آن اتم‌ها باعث می‌شوند پرتو ایکس به جهات خاص مختلفی پراکنده شود. این روش برای مشخصه‌یابی و شناسایی فازهای چندبلوری مختلف مناسب است.

روش XRD یک روش پایه برای مشخصه‌یابی ساختار بلوری مواد است. یکی از شاخصه‌های مهم تابش پرتو ایکس این واقعیت است که نمی‌توان آن را به راحتی متمرکز کرد، بنابراین اطلاعات در مورد ساختار مواد معمولاً از یک منطقه نسبتاً بزرگ (تقریباً ۵۰ μm) ارائه می‌شود. نمونه‌های پودری روی یک نگهدارنده نمونه صفحه‌ای تخت قرار می‌گیرند. در پراش پودری، داشتن نمونه‌ای با سطح صاف بسیار مهم است. از مزایای این روش این است که می‌توان از آنالیز غیرمخرب ساختار برای مقدار کمی پودر استفاده کرد و اندازه‌گیری‌ها را با افزایش دما انجام داد. برای آنالیز نانوشیء، این احتمال وجود دارد که پهن‌شدگی خطوط پراش مشاهده شود، که این امر آنالیز فاز را دشوار می‌سازد.

روش XRD می‌تواند متوسط فاصله بین لایه‌ها یا ردیف‌های اتم‌ها را اندازه‌گیری کند، جهت‌گیری یک تک‌بلور یا دانه را تعیین کند، ساختار کریستالی یک ماده ناشناخته و همچنین تنش داخلی نواحی بلوری



کوچک را بیابد و ویژگی‌های ساختاری مانند پارامترهای شبکه، کرنش، اندازه دانه، برآرایی<sup>۱</sup>، فاز و ترکیب را تعیین کند.

#### ۱۱-۲-۷ استانداردهای مرتبط

ISO/TR 14187, Surface chemical analysis - Characterization of nanostructured materials

#### ۱۲-۲-۷ طیف‌سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس

در روش XPS، نمونه به‌وسیله پرتو ایکس که در آن نفوذ می‌کند، تحت تابش قرار می‌گیرد. هنگامی که فوتون‌های پرتو ایکس یک فوتوالکترون تراز-هسته<sup>۲</sup> را تحریک می‌کنند، فوتوالکترون با انرژی جنبشی وابسته به پرتو ایکس فرودی و انرژی بستگی اوربیتال اتمی که از آن سرچشمه گرفته، منتشر می‌شود. در XPS، فوتوالکترون‌ها به‌عنوان تابعی از انرژی جنبشی‌شان، آزاد، شناسایی و شمارش می‌شوند. انرژی جنبشی و شدت فوتوالکترون‌ها برای شناسایی و تعیین غلظت سطحی عناصر موجود و حالت شیمیایی یا وضعیت پیوندی اتم تابشگر، آنالیز می‌شوند. XPS عناصری از لیتیم تا اورانیوم را شناسایی می‌کند. روش XPS می‌تواند عناصری با غلظت سطحی تقریبی ۰/۱ درصد اتمی را تشخیص دهد. حساسیت این روش به سطح مقطع فوتویونش<sup>۳</sup> هر عنصر بستگی دارد. با این روش، هم مواد رسانا و هم عایق را می‌توان آزمود. برای مواد غیررسانا، از افزاره‌های خنثی‌کننده مانند تفنگ‌های الکترونی با جریان بالا یا تفنگ‌های یون آرگون و یا هر دو، استفاده می‌شود تا بار سطحی به شیوه‌ای کنترل‌شده پایدار شود.

پرتو ایکس در برخی از سامانه‌های تصویربرداری تجاری می‌تواند به کوچکی  $10\ \mu\text{m}$  باشد. نقشه‌برداری شیمیایی با تفکیک‌پذیری عرضی تقریباً  $10\ \mu\text{m}$  امکان‌پذیر است. با این حال، این تفکیک‌پذیری عرضی برای بررسی یک نانوذره مجزا بسیار کم است، بنابراین مجموعه‌ای از نانوذرات باید اندازه‌گیری شوند. پرتوهای ایکس همچنین به عمق سطح نفوذ می‌کنند، با این حال، عمق فرار فوتوالکترون‌ها از مرتبه کمتر از  $10\ \text{nm}$  بوده و بنابراین اطلاعات از درون این عمق به دست می‌آید. روش XPS را می‌توان برای اندازه‌گیری شیمی و همچنین ضخامت پوشش‌های دور نانواشیاء، مانند پوسته در نانوذرات هسته-پوسته، و نیز عامل‌دار شدن شیمیایی سطح استفاده کرد.

آماده‌سازی دقیق نمونه برای اطمینان از کیفیت خوب داده‌ها ضروری است (به ISO 20579-4 مراجعه شود). روش XPS در خلاء فوق‌العاده بالا کار می‌کند و می‌تواند به همراه پایه‌های گرمایشی و سرمایشی استفاده شود.

**یادآوری** - در آینده، آنالیز XPS از نانواشیاء را می‌توان با استفاده از XPS تحت فشار نزدیک به محیط یا فناوری‌های جت مایع که در آن نانواشیاء در مایع پراکنده می‌شوند، انجام داد. این فنون جدید در حال توسعه هستند [38].

1- Epitaxy  
2- Core-level  
3- Photo-ionization

ISO 13424, Surface chemical analysis - X-ray photoelectron spectroscopy - Reporting of results of thin-film analysis

ISO/TR 14187, Surface chemical analysis - Characterization of nanostructured materials

ISO 16243, Surface chemical analysis - Recording and reporting data in X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)

ISO 16531, Surface chemical analysis - Depth profiling - Methods for ion beam alignment and the associated measurement of current or current density for depth profiling in AES and XPS

ISO 18116, Surface chemical analysis - Guidelines for preparation and mounting of specimens for analysis

ISO 18117, Surface chemical analysis - Handling of specimens prior to analysis

ISO 20579-4, Surface chemical analysis - Guidelines to sample handling, preparation and mounting - Part 4: Reporting information related to the history, preparation, handling and mounting of nano-objects prior to surface analysis

#### ۱۴-۲-۷ طیف‌سنجی پرتو ایکس تفکیک انرژی

روش EDX اغلب به همراه SEM و TEM استفاده می‌شود. در این روش، یک باریکه الکترونی به سطح یک نمونه رسانا برخورد می‌کند. انرژی باریکه معمولاً در گستره ۱۰ keV تا ۲۰ keV است. این برخورد باعث می‌شود که پرتوهای ایکس از نقطه‌ای در ماده که با باریکه الکترونی اولیه تحت تابش قرار گرفته است، نشر کنند. انرژی پرتوهای ایکس نشر شده به ترکیب شیمیایی موضعی ماده مورد مطالعه بستگی دارد.

این روش می‌تواند در مورد ترکیب عنصری از بریلیم (عدد اتمی ۴) تا انیشتینیم (عدد اتمی ۹۹) با حد آشکارسازی تقریباً ۰٫۱ درصد اتمی، اطلاعات ارائه دهد. نمونه‌های غیررسانا با EDX مشکل ایجاد می‌کنند، زیرا بمباران نمونه با الکترون‌ها شروع به باردار شدن خود نمونه می‌کند که مانع از خروج پرتوهای ایکس به‌طور مؤثر می‌شود. با این حال، شناسایی و آنالیز عناصر با عدد اتمی کم (مانند نیتروژن و کربن) به‌وسیله EDX به دلیل همپوشانی بین قله‌های مشخصه پرتو ایکس دشوار است. تفکیک‌پذیری فضایی برای EDX در تلفیق با SEM معمولاً برای نمونه‌های توده در گستره یک میکرومتر است. در انرژی‌های برانگیختگی پایین‌تر (زیر ۱۰ keV) یا زمانی که نانواشیاء روی فیلم‌های شفاف نسبت به الکترون<sup>۱</sup> آماده می‌شوند، تفکیک‌پذیری می‌تواند به زیر ۱۰۰ nm کاهش یابد [39]. هنگامی که EDX با TEM به کار می‌رود، تفکیک‌پذیری زیر ۱ nm است و توزیع (نقشه‌های) عنصری EDX با تفکیک‌پذیری بالا را می‌توان بر روی نانواشیاء چندسازه‌ای، مانند نانوذرات هسته-پوسته، انجام داد.

---

1- Electron-transparent films

### ۱۵-۲-۷ پراکندگی یون کم انرژی

در روش LEIS نمونه با یون‌های گاز نجیب (هلیوم، نئون و آرگون) با انرژی چند keV بمباران می‌شود که برخی از آنها به وسیله اتم‌های سطحی پس‌پراکنش می‌یابند. یون‌های گاز نجیب از نمونه پراکنده شده و در یک زاویه پراکندگی ثابت جمع‌آوری می‌شوند که سبب ایجاد یک طیف انرژی یون‌های پراکنده شده می‌شود. اتلاف انرژی در فرآیند پراکندگی حاوی اطلاعاتی درباره جرم اتمی که یون هلیوم از آن پراکنده شده و عمقی که پراکندگی در آن رخ داده است، می‌باشد. مساحت زیر یک قله مستقیماً به تعداد اتم‌های یک گونه خاص موجود در سطح آنالیز شده مربوط می‌شود.

آنالیز LEIS در خلاء فوق‌العاده بالا انجام می‌شود. از این روش می‌توان برای اندازه‌گیری ضخامت پوسته نانوذرات هسته-پوسته استفاده کرد که تطابق معناداری با XPS دارد [40].

### ۳-۷ اندازه‌دهی مربوط به آنالیز شیمیایی نانواشیاء به شکل نمونه‌های توده

#### ۱-۳-۷ اندازه‌دهی

اندازه‌دهی شرح داده شده در زیربند ۳-۷ را می‌توان برای آزمودن خواص شیمیایی کل نمونه که حاوی نانواشیاء است یا در برخی روش‌ها برای آنالیز حجم و عمق بزرگتری نسبت به لایه‌های سطحی، استفاده کرد. اکثر روش‌های ارائه شده، امکان آزمودن نانواشیاء و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آن‌ها را در اشکال مختلف از جمله پودر، فیلم‌های نازک، محصولات حاوی نانواشیاء مانند چندسازه‌ها و پراکنه‌ها فراهم می‌کند. اندازه‌دهی در جدول ۷ خلاصه شده است.

جدول ۷- اندازه‌دهی مربوط به آنالیز شیمیایی نانواشیاء و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آنها

اندازه‌دهی نهایی	اندازه‌دهی ویژه روش	روش	تفکیک پذیری عرضی روش	تفکیک پذیری عمقی روش	محدودیت‌ها	مراجع
ساختار، ترکیب سطوح زبر	ارتعاشات شیمیایی به صورت عدد موج ( $\text{cm}^{-1}$ ) اندازه‌گیری می‌شوند.	$\text{DRIFT}^1$	$>15 \mu\text{m}$	$0.1 \mu\text{m}$ تا $2.5 \mu\text{m}$ بسته به طول موج نور، زاویه برخورد و ضریب شکست نمونه	غالباً روی پودرهای خشک قابل اجراست. حساس به کربن دی‌اکسید و آب.	[41], [42]
ساختار، ترکیب	شدت در گستره باریکی از طول موج در یک زمان. ارتعاشات شیمیایی به صورت اختلاف عدد موج ( $\text{cm}^{-1}$ ) اندازه‌گیری می‌شود.	FTIR	$>15 \mu\text{m}$	$0.1 \mu\text{m}$ تا $2.5 \mu\text{m}$	غالباً روی پودرهای خشک قابل اجرا است. حساس به کربن دی‌اکسید و آب. مولکول باید در ناحیه فرسرخ فعال باشد. حساسیت و محدودیت تشخیص: ۰.۲٪ (که با فنون خاص به ۰.۱٪ می‌رسد).	[42], [43]

1- Diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy

مراجع	محدودیت‌ها	تفکیک پذیری عمقی روش	تفکیک پذیری عرضی روش	روش	اندازه‌ده ویژه روش	اندازه‌ده نهایی
[44], [45]	عموماً: QMS: ۲-۱۵۰ amu FTIR: $400\text{ cm}^{-1}$ تا $5500\text{ cm}^{-1}$ دما: دمای محیط تا $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ $0.1\text{ ppm}$ - $50\%$	N/A	N/A	آنالیزهای گرمایی (مانند TGA) یا EGA مشابه FTIR یا QMS	جریان یونی (A.S) عدد موج ( $\text{cm}^{-1}$ )، از دست دادن کمی جرم نمونه (mg)	ترکیب، شناسایی گازهای رهائش یافته از نمونه
[29]	تصحیحاتی برای پراکندگی ممکن است نیاز باشد. نمونه‌های جامد به لوازم جانبی بازتابی نیاز دارند.	N/A	N/A	UV-Vis	طیف جذب که به صورت جذب بر حسب طول موج (nm) رسم می‌شود.	غلظت، ترکیب
[46]	برای فلزات و آلیاژها قابل استفاده نیست. فلورسانس ناشی از ناخالصی‌ها یا خود نمونه می‌تواند طیف رامان را بپوشاند. گرم کردن نمونه با تابش قوی لیزر می‌تواند به نمونه آسیب رساند.	$0.5\text{ nm}$	$0.5\text{ nm}$ تا $10\text{ nm}$	طیف‌سنجی رامان	جابجایی بسامد پراکندگی غیرکشسان نور بر حسب تغییرات عدد موج ( $\text{cm}^{-1}$ )	ساختار، ترکیب
[47], [48], [49]	به رقیق شدن مناسب نیاز دارد (مستقیماً برای غلظت عددی بالا قابل استفاده نیست). جدول ۴ را مشاهده کنید.	N/A	N/A	sp-ICP-MS (به زیربند ۱۵-۵-۶ مراجعه شود)	جرم عنصری به ازای هر ذره؛ غلظت عددی ذرات؛ کسر جرمی عنصری (یونی) حل شده	ترکیب عنصری و جرم به ازای هر ذره
[50]	نیاز به تجزیه اسیدی و انحلال کامل نمونه دارد.	N/A	N/A		غلظت جرمی عنصری کل (جمع گونه‌های ذره‌ای و یونی)	ترکیب عنصری و جرم (-) ICP-MS, OES, ICP-(AES) ترکیب ایزوتوپ‌ها (ICP-MS)
در این جدول، تفکیک‌پذیری عمقی در ابتدا اشاره دارد به عمق آنالیز در نمونه‌ای که روش موردنظر در حال آشکارسازی آن است.						

## ۲-۳-۷ طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه

روش FTIR اطلاعات ویژه‌ای را در مورد پیوندهای شیمیایی و ساختارهای مولکولی ارائه می‌دهد که آن را برای آنالیز مواد آلی و معدنی مشخص، قابل‌استفاده می‌کند. پیوندهای شیمیایی در بسامدهای مشخصی ارتعاش می‌کنند و وقتی در معرض تابش فروسرخ قرار می‌گیرند، تابش را در بسامدهایی که با حالت‌های ارتعاشی آنها مطابقت دارد، جذب می‌کنند. اندازه‌گیری جذب تابش به‌صورت تابعی از بسامد، طیفی را تولید می‌کند که می‌تواند برای شناسایی گروه‌های عاملی و ترکیبات استفاده شود. روش FTIR می‌تواند برای شناسایی نوع و محل گروه‌های عاملی شیمیایی نانوآشیاء و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آنها و همچنین شناسایی مکان‌های فعال مختلف در نانوآشیاء فلزی و اکسید فلزی استفاده شود. این روش نیاز به آماده‌سازی کم و یا بدون آماده‌سازی دارد و در آن از انواع نگهدارنده‌های نمونه و سل‌های موجود، استفاده می‌شود. در صورت امکان بهتر است آب از نمونه خارج شود. از مهمترین مزایای این روش، سرعت بالای اندازه‌گیری، داشتن پایگاه داده بزرگی از مواد آزمون‌شده و غیرمخرب بودن آن است.

هنگامی که FTIR با بلور ATR جفت شود، می‌تواند فیلم بسیار نازک (با ضخامت تک‌لایه) یا گونه‌های مولکولی در فاز آبی (نیاز به تنظیم خاصی دارد) را تشخیص دهد. زمان تخمینی برای به‌دست آوردن طیف از یک نمونه معمولی بسته به نوع دستگاه و تفکیک‌پذیری موردنیاز از ۱ دقیقه تا ۱۰ دقیقه متغیر است. بسیاری از دستگاه‌های FTIR مجهز به کالیبراسیون خودکار با درستی بهتر از  $0.1 \text{ cm}^{-1}$  هستند. این امر نیاز به کالیبراسیون خارجی را از بین می‌برد. روش DRIFT یک روش طیف‌سنجی فروسرخ است که برای نمونه‌های پودری (با مساحت سطح بالا) استفاده می‌شود. عمق نفوذ در نمونه به خواص فیزیکی و نوری نمونه و همچنین پودر رقیق‌کننده مورد استفاده برای پروفایل‌سنجی عمقی بستگی دارد. از این روش می‌توان به‌عنوان جایگزینی برای روش قرص‌های فشرده‌شده استفاده کرد. DRIFT به راحتی می‌تواند بین مواد آلی و معدنی تمایز قائل شود.

نور فروسرخ بر روی یک نمونه بسته به خواص توده ماده در درجات مختلفی منعکس شده و عبور می‌کند. بازتاب پخشیده با انعکاس نور از سطوح ناهموار نمونه در تمام جهات تولید و با استفاده از یک آینه بیضی یا مخروطی جمع می‌شود. اندازه ذرات باید کوچکتر از طول موج نور فرودی باشد، بنابراین برای طیف‌سنجی فروسرخ متوسط، باید کمتر از  $5 \mu\text{m}$  باشد. طیف‌ها در واحد لگاریتم معکوس بازتاب ( $\log 1/R$ ) نسبت به عدد موج رسم می‌شوند. نمونه را می‌توان مستقیماً به شکل توده یا به‌صورت پراکنه‌هایی در زمینه‌های شفاف نسبت به فروسرخ، مانند پتاسیم برومید و پتاسیم کلرید، آنالیز کرد. رقیق شدن سنجیدنی در یک زمینه غیرجاذب، نسبت بازتاب پخشیده را در تمام نور منعکس‌شده افزایش می‌دهد. به‌طور معمول، نمونه جامد با استفاده از پتاسیم برومید به‌صورت همگن تا حدود ۵ تا ۱۰ درصد وزنی رقیق می‌شود.

روش FTIR توان عملیاتی بالا، نسبت سیگنال به نوفه بالا و درستی طول موج بالایی دارد. عمق نفوذ زیاد آن بدین معناست که می‌شود برای نیم‌رساناهای با گاف انرژی کم، طیف را به‌دست آورد. برای اکثر نمونه‌ها حداقل اطلاعات عنصری موجود است. حلال زمینه یا ماتریس جامد باید در ناحیه طیفی موردنظر نسبتاً شفاف باشد. به‌دست آوردن طیف فروسرخ از نمونه‌های مختلف مایع، جامد و گاز امکان‌پذیر است. با این حال،

بسیاری از مواد در برابر تابش فرسوخ غیرشفاف هستند و برای به دست آوردن طیف‌ها، باید در یک ماتریس شفاف حل یا رقیق شوند. در این شرایط به عنوان جایگزین امکان به دست آوردن مستقیم طیف بازتابشی یا نشری از نمونه‌های غیرشفاف فراهم می‌شود.

### ۳-۳-۷ استانداردهای مرتبط

ISO 10640, Plastics - Methodology for assessing polymer photoageing by FTIR and UV/visible spectroscopy

ISO/TS 14101, Surface characterization of gold nanoparticles for nanomaterial specific toxicity screening: FT-IR method

### ۴-۳-۷ آنالیز گرمایی به کمک آنالیزگر گاز خروجی همراه با FTIR یا QMS

روش TGA روشی برای آنالیز گرمایی است که در آن تغییرات جرم ماده به‌عنوان تابعی از افزایش دما با نرخ حرارت‌دهی ثابت، اندازه‌گیری می‌شود. این روش برای مطالعه گاز رهایش‌یافته از نمونه‌های حرارت داده‌شده که دستخوش تجزیه یا واجذب می‌شوند، استفاده می‌شود. با جفت کردن دستگاه آنالیز حرارتی (DSC یا TGA) با یک QMS یا FTIR، آشکارسازی گازهای رهایش‌یافته از نمونه و آنالیز آنها در زمان واقعی امکان‌پذیر است که همبستگی با سایر سیگنال‌های آنالیز گرمایی (از دست دادن جرم یا انتقال گرماگیر) را فراهم می‌کند.

برای آزمون DSC مقدار کمی از نمونه (۵ mg تا ۱۰ mg) استفاده می‌شود و نمونه‌ها باید با گاز بی‌اثر گازدهی شوند تا پایداری شرایط اندازه‌گیری فراهم شود. قبل از آزمون لازم است یک آزمون شاهد با دستگاه آنالیز حرارتی و طیف‌سنج با تنظیمات مشابهی که برای نمونه استفاده می‌شود، انجام گیرد.

آنالیز گرمایی می‌تواند ترکیب شیمیایی مواد در فاز جامد یا گاز را تعیین و نوع و محل گروه‌های عاملی شیمیایی نانواشیاء و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آنها را شناسایی کند. با استفاده از طیف‌سنج QMS و FTIR به همراه دستگاه آنالیز گرمایی می‌توان نتایج تکمیلی را به دست آورد. روش TGA با EGA معمولاً اطلاعات کیفی در مورد ترکیب ارائه می‌دهد، اما کمی‌سازی حتی به‌وسیله FTIR یا QMS چالش برانگیز است.

### ۵-۳-۷ استانداردهای مرتبط

ISO/TS 11308, Nanotechnologies - Characterization of carbon nanotube samples using thermogravimetric analysis

ISO 11358-1, Plastics - Thermogravimetry (TG) of polymers - Part 1: General principles

ISO 21870, Rubber compounding ingredients - Carbon black - Determination of high-temperature loss on heating by thermogravimetry

### ۶-۳-۷ طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی

طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی (UV-Vis) می‌تواند برای شناسایی برخی از گروه‌های عاملی در مولکول‌ها و سنجش آنها استفاده شود. در فناوری نانو، طیف‌سنجی UV-Vis می‌تواند اطلاعات مهمی در مورد نانوآشیاء از طریق مطالعات SPR ارائه کند و اطلاعاتی در مورد اندازه‌ها و کمی‌سازی مقدار مواد، ارائه دهد. مقدار جذب شدیداً به اندازه ذرات، محیط دی‌الکتریک و محیط شیمیایی اطراف بستگی دارد. تفکیک‌پذیری یک طیف‌سنج نوری UV-Vis معمولاً به پهنای طیف نواری آن مرتبط است. هرچه پهنای طیف نواری کوچکتر باشد، تفکیک‌پذیری تصویر ریزتر است. پهنای طیف نواری به عرض شکاف و قدرت پراکندگی تک‌فام‌ساز<sup>۱</sup> بستگی دارد. برای دستگاه‌های دیود آرایه‌ای، تفکیک‌پذیری به تعداد دیودهای داخل آرایه نیز بستگی دارد. محدوده طول موج عموماً بین ۱۹۰ nm تا ۹۰۰ nm با تفکیک‌پذیری ۰٫۱ nm است [45].

### ۷-۳-۷ استانداردهای مرتبط

ISO 10640, Plastics - Methodology for assessing polymer photoageing by FTIR and UV/visible spectroscopy

ISO/TS 10868, Nanotechnologies - Characterization of single-wall carbon nanotubes using ultraviolet-visible-near infrared (UV-Vis-NIR) absorption spectroscopy

### ۸-۳-۷ طیف‌سنجی رامان

طیف‌سنجی رامان از اثر رامان استفاده می‌کند که پراکندگی غیرکشسان نور با تغییر بسامد ناشی از انتقال انرژی بین نمونه و نور فرودی است. این جابه‌جایی بسامد، اطلاعاتی در مورد حالت‌های ارتعاشی در نمونه و از این‌رو، اطلاعات شیمیایی فراهم می‌آورد و مکمل طیف‌سنجی فروسرخ است. طیف‌سنجی رامان می‌تواند بین ایزوتوپ‌ها تمایز قائل شود. همچنین در شرایط خاص، می‌تواند اطلاعاتی درباره ابعاد ارائه دهد (به زیربند ۴-۶-۱۱ مراجعه شود).

### ۹-۳-۷ روش‌های پلاسمای جفت‌شده القایی

در روش ICP، یک نمونه پراکنه مایع در دمای بالا درون پلازما اسپری می‌شود که در آنجا اتم‌ها یونیزه شده و آشکارسازی می‌شوند. آشکارساز می‌تواند ICP-MS یا ICP-OES باشد که دومی، با نام ICP-AES نیز شناخته می‌شود. شدت هر قله در نسبت جرم به بار (ICP-MS) یا طول موج (ICP-OES/AES) معین با عناصر مرجع که غلظت جرمی مشخص دارند، مقایسه می‌شود تا غلظت هر عنصر محاسبه شود. این روش امکان به‌دست آوردن اطلاعات غلظتی و شیمیایی را فراهم می‌کند.

برای روش sp-ICP-MS، به زیربند ۶-۵-۱۵ مراجعه شود، زمان اندازه‌گیری برای یک نسبت خاص جرم عنصر به بار، به پنجره‌های زمانی به اندازه کافی کوچک تقسیم می‌شود، به طوری که ذرات منفرد با شدت سیگنال متناسب با تعداد اتم‌های هر ذره آشکارسازی می‌شوند. این فرآیند، اطلاعات شیمیایی را همراه با

1- Monochromator

اندازه‌گیری جرم عنصری هر ذره فراهم می‌کند و در تلفیق با غلظت عددی اندازه‌گیری‌شده، غلظت جرمی ذره را می‌دهد.

#### ۱۰-۳-۷ استانداردهای مرتبط

ISO 11885, Water quality - Determination of selected elements by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES)

ISO/TS 13278, Nanotechnologies - Determination of elemental impurities in samples of carbon nanotubes using inductively coupled plasma mass spectrometry

ISO 17294-1, Water quality - Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) - Part 1: General guidelines

ISO 17294-2, Water quality - Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) - Part 2: Determination of selected elements including uranium isotopes

#### ۱۱-۳-۷ زاویه تماس

زاویه تماس، زاویه اندازه‌گیری‌شده بین یک مایع و یک سطح است. این زاویه، ترشوندگی سطح به‌وسیله مایع را مشخص می‌کند. همچنین می‌توان زوایای تماس را به‌صورت پویا نیز اندازه‌گیری نمود. این زوایا معمولاً با استفاده از روش قطره ثابت‌شده روی سطح اندازه‌گیری می‌شوند که در آن، زاویه قطره روی سطح به‌صورت نوری اندازه‌گیری می‌شود. این روش برای اندازه‌گیری خواص یک نانوشیء منفرد نیست، بلکه باید از پوشش پیوسته نانوشیاء روی یک سطح استفاده کرد و می‌تواند از پراکنه مایع به‌دست آید. زاویه تماس به‌دست آمده، هم به شیمی و هم به توپوگرافی (پستی و بلندی) سطح بستگی دارد.

#### ۸ اندازه‌دهه‌های مربوط به جرم و چگالی

##### ۱-۸ کلیات

بند ۸، اندازه‌دهه‌های مربوط به جرم و چگالی را پوشش می‌دهد. اندازه‌دهه‌های اصلی در این بخش عبارتند از:

الف- جرم و توزیع جرمی نانوشیاء؛

ب- چگالی و توزیع چگالی نانوشیاء؛

پ- اندازه‌دهه‌های حجم و اندازه نانوشیاء به‌طوریکه با جزئیات در بند ۶ توضیح داده شده‌اند.

##### ۲-۸ هواسل‌ها

##### ۱-۲-۸ اندازه‌دهه‌ها

اندازه‌دهه‌ها در جدول ۸ نمایش داده شده‌اند و در زیربندهای پیش‌رو با جزئیات کامل و به همراه روش‌های اندازه‌گیری شرح داده خواهند شد.



جدول ۸- اندازه‌ده‌های مرتبط با اندازه‌گیری جرم و چگالی نانواشیاء در یک هواسل

اندازه‌ده نهایی	اندازه‌ده ویژه هر روش	روش	محدوده	تفکیک پذیری	محدودیت‌ها	مراجع
توزیع جرمی	توزیع جرم به بار (m/z)	تحلیلگر جرم ذره هواسل	۰/۰۰۱ fg تا حدود ۱۰۰ fg ۱۰ nm تا ۱۰ μm	کسر جرمی ۱۰٪ جرم مرکزی توزیع	متکی بودن به ذرات باردار شده	[51]
	توزیع زمان پرواز جرم به بار (m/z)	تحلیلگر زمان پرواز جرم ذره	۱ m/z تا m/z ۱۲۰۰	m/Δm تا مقدار ۴۰۰۰ برای ۰/۰۵ μgm <sup>-3</sup>		[52]

۸-۲-۲ استانداردهای مرتبط

ISO 8573-8, Compressed air - Part 8: Test methods for solid particle content by mass concentration

ISO 9276-5, Representation of results of particle size analysis - Part 5: Methods of calculation relating to particle size analyses using logarithmic normal probability distribution

ISO 10808, Nanotechnologies - Characterization of nanoparticles in inhalation exposure chambers for inhalation toxicity testing

ISO/TS 12025, Nanomaterials - Quantification of nano-object release from powders by generation of aerosols

ISO 12154, Determination of density by volumetric displacement - Skeleton density by gas pycnometry

۸-۲-۳ تحلیلگر جرم ذره هواسل

این تحلیلگر از دو الکتروستاتوانه‌ای تشکیل شده‌است که حول یک محور مشترک می‌چرخند. ذرات نمونه هواسل، باردار شده و وارد شکاف حلقوی می‌شوند و الکترودها با سرعت مشابه در حال چرخش هستند. هنگامی که ولتاژی به الکتروستات داخلی اعمال می‌شود، ذرات دو نیروی مخالف مرکزگرا و الکتروایستا را تجربه می‌کنند. از توازن این نیروها می‌توان جرم ذرات را محاسبه کرد.

۸-۲-۴ طیف‌سنجی جرمی زمان پرواز

این روش نوعی از طیف‌سنجی جرمی است که در آن نسبت جرم به بار یک نانوذره باردار شده از طریق اندازه‌گیری زمان پرواز تعیین می‌شود. ابتدا ذرات به وسیله یک میدان الکتریکی با قدرت مشخص شتاب می‌گیرند. این شتاب باعث می‌شود که ذرات با بار یکسان، انرژی جنبشی یکسانی داشته باشند. بنابراین سرعت ذره به نسبت جرم به بار بستگی دارد. زمانی که متعاقباً طول می‌کشد تا ذره به آشکارساز در فاصله‌ای مشخص برسد، اندازه‌گیری می‌شود. این زمان به نسبت جرم به بار ذره بستگی دارد (ذرات سنگین‌تر با

سرعت کمتری می‌رسند و به زمان بیشتری نیاز دارند). براساس این زمان و پارامترهای مشخص آزمون، نسبت جرم به بار نانوذره تعیین می‌شود. همچنین می‌توان از این روش برای تعیین توزیع اندازه به شکل هواسل و آنالیز شیمیایی هواسل‌ها استفاده کرد.

### ۳-۸ پودرها

#### ۱-۳-۸ اندازه‌ده‌ها

برای اندازه‌گیری‌های جرم یا چگالی عموماً لازم است که نانواشیائی که به‌صورت پودر هستند به هواسل تبدیل شده یا در یک حلال پراکنده شوند و سپس به ترتیب با روش‌های شرح داده‌شده در زیربندهای ۲-۸ و ۴-۸ آنالیز شوند. چنانچه به دنبال توزیع اندازه ذرات مجزا باشیم، باید دقت شود کلوخه‌ها و انبوهه‌ها حذف شوند. با این حال، چگالی پودر نانواشیاء را می‌توان به‌طور مستقیم با چگالی سنجی<sup>۱</sup> گازی به‌طوریکه در جدول ۹ ارائه شده‌است، اندازه‌گیری کرد.

جدول ۹- اندازه‌ده‌های مرتبط با اندازه‌گیری جرم و چگالی نانواشیاء به شکل پودر

اندازه‌ده نهایی	اندازه‌ده ویژه هر روش	روش	محدوده	تفکیک‌پذیری	محدودیت‌ها	مراجع
چگالی	حجم جابه‌جایی گاز	چگالی سنجی	تا $0.1 \text{ g/cm}^3$ $1.0 \text{ g/cm}^3$	$\pm 0.01\%$	حجم و جرم به‌طور جداگانه اندازه‌گیری شده و بر هم تقسیم می‌شوند تا چگالی به‌دست آید.	[53] [54] ISO 12154

#### ۲-۳-۸ چگالی سنجی

چگالی سنجی، چگالی توده‌ای یا اسکلتی جامدات، در اینجا پودر نانوشیء را از طریق جابه‌جایی گاز و با استفاده از قانون بویل<sup>۲</sup> که بر رابطه حجم-فشار حاکم است، اندازه‌گیری می‌کند. دستگاه، مقدار جابه‌جایی حجم گاز به‌وسیله پودر نانوذره را اندازه‌گیری کرده و با اندازه‌گیری جرم به‌طور جداگانه، می‌توان چگالی را محاسبه کرد.

#### ۳-۳-۸ استانداردهای مرتبط

ISO 12154, Determination of density by volumetric displacement - Skeleton density by gas pycnometry

1- Pycnometry

2- Boyle's law

۴-۸ پراکنه‌های مایع

۱-۴-۸ اندازه‌ده‌ها

اندازه‌ده‌ها در جدول ۱۰ نشان داده شده‌اند و در زیربندهای زیر با جزئیات کامل و به همراه روش‌های اندازه‌گیری شرح داده خواهند شد.

جدول ۱۰- اندازه‌ده‌های مربوط به جرم و چگالی برای نانوآشپاء در پراکنه‌های مایع

اندازه‌ده نهایی	اندازه‌ده ویژه هر روش	روش	محدوده	تفکیک پذیری	محدودیت‌ها	مراجع
توزیع چگالی	عبور نور به‌عنوان تابعی از نرخ ته‌نشینی براساس موقعیت	ته‌نشینی مایع مرکز‌گریز (روش‌های هم‌چگالی و چندسرعت)	$0.1 \text{ gcm}^{-3}$ تا $10 \text{ gcm}^{-3}$	کسر جرمی $\pm 4\%$	هنوز در مراحل توسعه قرار دارد.	[14], [29]
	عبور نور به‌عنوان تابعی از نرخ ته‌نشینی بر اساس موقعیت	ته‌نشینی مایع مرکز‌گریز (روش هم‌چگالی)	$10^{-18} \text{ g}$ تا $10^{-11} \text{ g}$ ( $1 \text{ ag}$ تا $10 \text{ pg}$ )	کسر جرمی $\pm 4\%$	هنوز در مراحل توسعه قرار دارد.	[14], [29]
توزیع جرمی	شدت پراکندگی به صورت تابعی از زاویه توزیع اندازه ذرات	پراکندگی ایستای نور	$0.001 \text{ ag}$ تا $100 \text{ ag}$ ( $10 \text{ MD}$ تا $1 \text{ kD}$ ) $0.05 \mu\text{m}$ تا $2000 \mu\text{m}$	کسر جرمی $5\%$	نمونه پراکنده شده باید شفاف باشد و نور با طول موج استفاده شده را جذب نکند. معمولاً حجم بالایی از نمونه (ml) لازم است.	[55]
توزیع جرمی، توزیع چگالی	جرم ذرات مجزا	اندازه‌گیری جرم تشدید	$350 \text{ ag}$ $50 \text{ nm}$ تا $5 \mu\text{m}$	کسر جرمی $\pm 3\%$ $0.002 \text{ gcm}^{-3}$		[56]

#### ۸-۴-۲ استانداردهای مرتبط

ISO 8573-8, Compressed air - Part 8: Test methods for solid particle content by mass concentration

ISO 9276-5, Representation of results of particle size analysis - Part 5: Methods of calculation relating to particle size analyses using logarithmic normal probability distribution

ISO 13318-1, Determination of particle size distribution by centrifugal liquid sedimentation methods - Part 1: General principles and guidelines

ISO 16014-5, Plastics - Determination of average molecular weight and molecular weight distribution of polymers using size-exclusion chromatography - Part 5: Light-scattering method

ISO 18747-1, Determination of particle density by sedimentation methods - Part 1: Isopycnic interpolation approach

ISO 18747-2, Determination of particle density by sedimentation methods - Part 2: Multi-velocity approach

#### ۸-۴-۳ تهنشینی مرکزگریز مایع (روش هم‌چگالی)<sup>۱</sup>

به زیربند ۸-۳-۲ مراجعه شود. ذرات در سطحی تهنشین می‌شوند که چگالی آن‌ها با محیط اطراف مطابقت داشته باشد، از این‌رو اصطلاح هم‌چگال به معنای «با چگالی مشابه<sup>۲</sup>» است. میزان نرخ تهنشینی، جرم ذرات را می‌دهد و نقطه تهنشینی تعادلی یا غیرتعادلی، چگالی را مشخص می‌کند.

#### ۸-۴-۴ پراکندگی ایستای نور

در روش SLS، یک نور تک‌رنگ با شدت بالا، معمولاً نور لیزر، از محلولی حاوی نانوذرات عبور می‌کند. آشکارسازهای تکی یا چندگانه برای اندازه‌گیری شدت پراکندگی در یک یا چند زاویه استفاده می‌شوند. وابستگی زاویه‌ای شدت پراکندگی برای به‌دست آوردن اندازه نانوذرات با شعاع بالاتر از ۱٪ تا ۲٪ طول موج فرودی استفاده می‌شود. بسته به جهت زوایای آشکارساز نسبت به جهت نور تابشی، روش SLS به صورت LALS<sup>۳</sup>، RALS<sup>۴</sup>، MALS<sup>۵</sup> اجرا می‌شود.

#### ۸-۴-۵ اندازه‌گیری جرم تشدید

روش RMM ذراتی در محدوده اندازه ۵۰ nm تا ۵ μm را شناسایی و شمارش کرده و جرم شناور و اندازه آنها را اندازه می‌گیرد. این روش از یک مجرای میکروسپال که از درون یک تیرک تشدید عبور می‌کند، جرم ذرات داخل مایع عبوری از مجرا را شمارش، اندازه‌گیری و آشکارسازی می‌کند. جرم ذره، بسامد تشدید

---

1- Isopycnic  
2- Of the same density  
3- Low angle light scattering  
4- Right angle light scattering  
5- Multi- angle light scattering

تیرک را تغییر می‌دهد که مستقیماً با جرم شناور ذره مرتبط است. این روش همچنین امکان شمارش درست ذرات در نمونه را فراهم می‌کند. در این روش، ذرات با چگالی مشابه ذرات محلول، آشکارسازی نمی‌شوند. همچنین مقدار چگالی برای ارزشیابی اندازه یا حجم مورد نیاز است. از این‌رو، کمینه اندازه یک ذره شناسایی شده به کمینه جرم قابل آشکارسازی بستگی دارد.

## ۹ اندازه‌ده‌های مربوط به بار- پراکنه‌های مایع

### ۱-۹ اندازه‌ده‌ها

پتانسیل الکتروجنبشی یا پتانسیل زتا، پتانسیل الکتریکی در فصل مشترک لایه دوگانه در محل صفحه لغزش نسبت به یک نقطه در توده سیال و دور از فصل مشترک است. به عبارت دیگر، پتانسیل زتا اختلاف پتانسیل بین محیط پراکنه و لایه ثابت سیال که به ذره پراکنده متصل است را نشان می‌دهد. پتانسیل زتا یک ویژگی ذاتی نانوشیء نیست، زیرا هم به ذرات و هم به محیطی که در آن پراکنده شده‌اند، بستگی دارد. اندازه‌ده‌ها در جدول ۱۱ آورده شده‌اند و با جزئیات بیشتر همراه با روش‌ها در زیربندهای بعدی توضیح داده خواهند شد.

جدول ۱۱- اندازه‌ده‌های مربوط به بار

اندازه‌ده نهایی	اندازه‌ده ویژه هر روش	روش	محدوده	تفکیک پذیری	محدودیت‌ها	مراجع
بار، پتانسیل زتا	تحرك پذیری الکتروکوچی (سرعت ذره/ شدت میدان اعمالی)	پراکنده‌گی نور الکتروکوچی	۵۰۰ mV - تا ۵۰۰ mV	۰٫۱ mV	امکان تخریب برخی از مواد در میدان الکتریکی اعمالی وجود دارد. غلظت‌ها باید برای آشکارسازی پراکنده‌گی نور مناسب باشند.	[57], [58]
بار، پتانسیل زتا	تحرك پذیری پویای الکتروکوچی	اندازه‌گیری الکتروصوتی	۵۰۰ mV - تا ۵۰۰ mV	۰٫۱ mV	نیاز به کالیبراسیون دارد. برای ذرات بزرگتر (> ۳۰۰ nm) پاسخ به جرم ذره بستگی دارد.	[59]

### ۲-۹ استانداردهای مرتبط

ISO 13099-1, Colloidal systems - Methods for zeta-potential determination - Part 1: Electroacoustic and electrokinetic phenomena

ISO 13099-2, Colloidal systems - Methods for zeta-potential determination - Part 2: Optical methods

ISO 13099-3, Colloidal systems - Methods for zeta potential determination - Part 3: Acoustic methods

### ۳-۹ پراکندگی نوری الکتروکوچی

الکتروکوچی حرکت ذرات پراکنده در یک سیال تحت تأثیر میدان الکتریکی فضایی یکنواخت است. پتانسیل زتای پراکنه با اعمال میدان الکتریکی در سراسر پراکنه اندازه‌گیری می‌شود. ذرات درون پراکنه با پتانسیل زتا، با سرعتی متناسب با بزرگی پتانسیل زتا به سمت الکتروود با بار مخالف، مهاجرت می‌کنند. این سرعت با استفاده از آنومتری داپلر لیزری<sup>۱</sup> اندازه‌گیری می‌شود. جابجائی بسامد یا جابه‌جائی فاز یک باریکه لیزر فرودی که به سبب وجود این ذرات متحرک ایجاد شده‌است، مقدار تحرک‌پذیری ذرات را نشان می‌دهد و این تحرک‌پذیری با توجه به گرانی ماده پراکنده‌ساز و تراوایی دی‌الکتریک و به کارگیری تئوری مناسب، به پتانسیل زتا تبدیل می‌شود.

### ۴-۹ اندازه‌گیری پدیده‌های الکتروصوتی

از دو اثر الکتروصوتی برای تعیین پتانسیل زتا استفاده می‌شود: جریان ارتعاش کلویید (CVC)<sup>۲</sup> و دامنه صوتی الکتروجنبشی (ESA)<sup>۳</sup>. این دستگاه‌ها تحرک‌پذیری پویای الکتروکوچی را اندازه‌گیری می‌کنند که به پتانسیل زتا بستگی دارد.

جریان ارتعاش کلویید زمانی ایجاد می‌شود که امواج فراصوت درون سیالی حاوی نانوذرات باردار منتشر می‌شود. گرادیان فشار در موج فراصوت، نانوذرات را نسبت به سیال حرکت می‌دهد. حرکت سیال نسبت به ذره، یون‌های نفوذ کرده در لایه دوگانه الکتریکی را در جهت یکی از قطب‌ها می‌کشاند. در نتیجه این کشش، یون‌های منفی بیشتری در مجاورت یک قطب و تجمع بار سطحی مثبت در قطب دیگر به وجود می‌آید که منجر به یک گشتاور دوقطبی<sup>۴</sup> در ذره می‌شود. این گشتاورهای دوقطبی یک میدان الکتریکی ایجاد می‌کنند که به نوبه خود جریان الکتریکی تولید می‌کند.

دامنه صوتی الکتروجنبشی، معکوس جریان ارتعاشی کلوییدی است. این اثر تحت‌تأثیر یک میدان الکتریکی نوسانی رخ می‌دهد. این میدان نانوذرات را نسبت به مایع حرکت می‌دهد که منجر به تولید فراصوت می‌شود. روش‌های الکتروصوتی این مزیت را دارند که می‌توانند اندازه‌گیری‌ها را در نمونه‌های تازه تولید شده، بدون نیاز به رقیق‌سازی و در کسر حجمی تا ۵۰٪ انجام دهند. محاسبه پتانسیل زتا از تحرک‌پذیری پویای الکتروکوچی به اطلاعاتی در مورد چگالی ذرات و مایع نیاز دارد. علاوه بر این، برای ذرات بزرگتر از ۳۰۰ nm، اطلاعات مربوط به اندازه ذرات لازم است تا میرایی<sup>۵</sup> وابسته به اندازه حرکت الکتروصوتی تصحیح شود.

### ۱۰ اندازه‌ده‌های مربوط به بلورینگی

#### ۱-۱۰ اندازه‌ده‌ها

اندازه‌ده‌های اصلی مرتبط با بلورینگی عبارتند از:

- 
- 1- Laser Doppler anemometry
  - 2- Colloid vibration current
  - 3- Electrokinetic sonic amplitude
  - 4- Dipole moment
  - 5- Damping

الف - درجه بلورینگی؛

ب - ساختار بلوری شامل سامانه شبکه و پارامترهای شبکه؛

پ - شاخص بلورین - درصد ماده بلوری؛

ت - نقطه ذوب؛

ث - دمای انتقال شیشه‌ای.

اندازه‌ده‌ها در جدول ۱۲ خلاصه شده‌اند. در این جدول، بیشتر روش‌ها برای به‌کارگیری در مورد انبوهه‌ها و پودرها هستند. برای نانوشیء منفرد، روش‌های TEM، SEM و بلورشناسی رامان را می‌توان استفاده کرد.

جدول ۱۲- اندازه‌ده‌های مرتبط با بلورینگی

مراجع	محدودیت‌ها	تفکیک پذیری (در بهترین نقطه محدوده)	محدوده	روش	اندازه‌ده ویژه هر روش	اندازه‌ده نهایی
[60], [61]	کیفی	۰٫۵ nm	۱ nm تا ۱۵۰	SAXS	زاویه و شدت پراکندگی پرتو ایکس	سامانه شبکه ثابت شبکه
[62]	کیفی؛ غیرایده‌ال برای سامانه‌های دوجزئی و بی‌شکل	۰٫۱ nm	۱ nm تا ۲/۵ μm	USAXS	زاویه و شدت پراکندگی پرتو ایکس	سامانه شبکه، ثابت شبکه
[62]	کیفی	<۰٫۱ nm	<۱ nm	WAXS	زاویه و شدت پراکندگی پرتو ایکس	سامانه شبکه، ثابت شبکه
[63]	تفکیک‌پذیری به‌طور معکوس با اندازه سلول واحد متناسب است. اطلاعاتی راجع به فاز نمی‌دهد. اتم‌های سبک در حضور اتم‌های سنگین به سختی تمایز داده می‌شوند.	۰٫۱۰۵ nm تا ۰٫۵ nm	۰٫۱ nm تا ۲ nm؛ ٪ تا ٪۱۰۰	پراش پرتو ایکس	زاویه و شدت پراکندگی پرتو ایکس	سامانه شبکه، ثابت شبکه، بلورینگی، شاخص بلورین
[64]	تفکیک‌پذیری با نسبت معکوس نسبت به مساحت تصویربرداری (بزرگنمایی) تغییر می‌کند. نیاز به خلاء بسیار بالا دارد. باریکه الکترونی باعث تخریب می‌شود.	۰٫۱۰۵ nm	۵۰ μm تا ۰٫۵ nm	TEM	زاویه، دامنه و فاز پراکندگی الکترون	سامانه شبکه، بلورینگی، شاخص بلورین

مراجع	محدودیت‌ها	تفکیک پذیری (در بهترین نقطه محدوده)	محدوده	روش	اندازه‌ده ویژه هر روش	اندازه‌ده نهایی
[65], [66]	معمولاً به یک نمونه رسانا الکتریکی یا دارای پوشش رسانا در خلاء نیاز دارد.	EBSD ۰٫۵ nm RHEED ۰٫۵ nm LEED < ۰٫۱ nm	۱ nm تا ۱۰۰۰ μm	EBSD, RHEED, LEED	زاویه، دامنه و فاز پراکندگی الکترون	سامانه شبکه بلورینگی شاخص بلورین
[67]	نیاز به پودر یا بلورهایی بزرگتر از ۱ mm <sup>3</sup> دارد.	۰٫۱ nm	۰٫۱ nm تا ۵۰۰۰ μm	پراش نوترون	زاویه، دامنه و فاز پراکندگی نوترون	سامانه شبکه بلورینگی شاخص بلورین
[68], [69]		۰٫۲ °C	۱۸۰ °C تا ۱۷۵۰ °C	DCS	شارش گرما	بلورینگی نقطه ذوب دمای انتقال شیشه‌ای شاخص بلورین
[70], [71]	روش کند و گران نیاز به برچسب‌زنی با ایزوتوپ‌ها دارد.	< ۰٫۱ nm	تا ۱۰۰ kDa	بلورنگاری NMR	بسامد تشدید به صورت تابعی از میدان مغناطیسی	بلورینگی شاخص بلورین
[72]				بلورنگاری رامان	جابجایی بسامد پراکندگی رامان	بلورینگی دستوارگی <sup>۱</sup> (برای نانولوله کربنی)

#### ۱۰-۲ پراکندگی پرتو ایکس زاویه کوچک / زاویه بزرگ

روش‌های SAXS و WAXS شامل پراکندگی کشسان پرتوهای ایکس با طول موج ۰٫۱ nm تا ۰٫۲ nm به وسیله نمونه حاوی نانواشیاء هستند. پرتوهای ایکس پراکنده شده، در زوایای کوچک (۰٫۱ تا ۱۰ درجه) یا در زوایای بزرگ (۱۰ درجه تا ۹۰ درجه) ثبت می‌شوند. این روش‌ها اطلاعاتی راجع به شکل و اندازه نانوذرات، فواصل مشخصه مواد تقریباً منظم، اندازه حفرات و سایر داده‌ها فراهم می‌کنند. در روش SAXS، امکان به دست آوردن اطلاعات ساختاری از نانوذرات با ابعاد ۱ nm تا ۱۵۰ nm وجود دارد. روش WAXS

1- Chirality



حتی ابعاد کوچکتر را نیز شناسایی می‌کند. به‌طور کلی، روش WAXS برای مطالعه ساختارهای به شدت منظم و بلورین به‌کار می‌رود، در حالی که SAXS بیشتر برای مواد بی‌شکل یا غیرهمگن و سامانه‌های دوجزئی کاربرد دارد.

#### ۱۰-۳ پراش پرتو ایکس

پراش پرتو ایکس روشی است که در آن اتم‌های بلورین باعث می‌شوند باریکه‌ای از پرتو ایکس به جهات به خوبی تعریف شده‌ای پراکنده شود. با اندازه‌گیری زوایا و شدت‌های این باریکه‌های پراشیده، تصویری سه‌بعدی از چگالی الکترون‌های درون بلور ایجاد می‌شود. از این نقشه چگالی الکترون، موقعیت اتم‌ها در بلور و همچنین حالت‌های پیوند شیمیایی آنها، ماهیت هر نوع بی‌نظمی و اطلاعات مختلف دیگری مشخص می‌شود. هر چقدر که سلول واحد بلور بزرگتر و پیچیده‌تر شود، تفکیک‌پذیری پراش پرتو ایکس کاهش می‌یابد. در حضور اتم‌های سنگین با الکترون‌های زیاد، تشخیص اتم‌های سبک با پراش پرتو ایکس دشوارتر می‌شود. پراکندگی کل یا تحلیل تابع توزیع جفت، نه تنها از پراکندگی ماده بر اساس قانون براگ<sup>۱</sup>، بلکه از پراکندگی نفوذی نیز استفاده می‌کند تا فراتر از ساختار میانگین ماده، ساختار موضعی یا کوتاه‌برد را نیز بررسی کند.

#### ۱۰-۴ میکروسکوپی الکترونی عبوری با تفکیک‌پذیری بالا

روش HRTEM قادر به تصویربرداری مستقیم از ساختار بلورین و اتمی یک نمونه NOAA است. در این روش، از نانوشیء به کمک ثبت توزیع دامنه موج فضایی دوبعدی در صفحه تصویر، مشابه یک میکروسکوپ نوری، تصویربرداری می‌شود. در حال حاضر، بالاترین تفکیک‌پذیری نقطه‌ای در TEM از نوع تباین فاز، برابر  $0.5 \text{ \AA}$  است. در این مقیاس، اتم‌های منفرد یک بلور و هر گونه نقص ساختاری را می‌توان مشاهده کرد. برای بلورهای سه‌بعدی، لازم است چندین نمای گرفته شده از زوایای مختلف در یک نقشه سه‌بعدی تلفیق شوند.

#### ۱۰-۵ پراش الکترون برگشتی

پراش الکترونی شامل شلیک الکترون‌ها به یک نمونه NOAA و مشاهده الگوی تداخل حاصل از الکترون‌های پراکنده‌شده، است. ساختار تناوبی یک جامد بلورین مانند یک توری پراش عمل کرده و الکترون‌ها را با الگویی متناظر با آن پراکنده می‌کند. بنابراین ساختار بلور با عملیات بازگشت به شبکه معکوس از الگوی پراش الکترون مشاهده‌شده، به دست می‌آید. پراش الکترونی همچنین برای مطالعه نظم کوتاه‌برد در نانوذرات بی‌شکل نیز استفاده می‌شود. روش EBSD می‌تواند برای اندیس‌گذاری و شناسایی سامانه‌های بلوری، نقشه‌برداری جهت‌گیری بلوری، بررسی نقص‌ها، شناسایی فاز، مطالعات مرزدانه و ریخت‌شناسی، بررسی‌های ناهمگنی منطقه‌ای، تمایز مواد، نقشه‌برداری میکرو کرنش<sup>۲</sup> و شناسایی فیزیکوشیمیایی با استفاده از روش‌های تکمیلی، مورد استفاده قرار گیرد. این روش می‌تواند مکمل روش پراش پرتو ایکس برای مطالعه بلورهای

1- Bragg scattering

2- Microstrain

بسیار کوچک (با ابعاد کمتر از  $1 \mu\text{m}$ ) از مواد معدنی، آلی و زیستی مانند پروتئین‌هایی که نمی‌توانند به راحتی بلورهای سه‌بعدی بزرگ مورد نیاز برای XRD را تشکیل دهند، باشد. برخلاف XRD، اطلاعات عامل فاز ساختار بلورنگاشتی<sup>۱</sup> را می‌توان به صورت تجربی در پراش الکترونی تعیین کرد. روش EBSD تجربی با استفاده از یک SEM مجهز به آشکارساز EBSD انجام می‌شود.

#### ۱۰-۶ پراش نوترونی

بلورنگاری نوترونی شامل استفاده از پراکندگی نوترون برای تعیین ساختار بلورنگاشتی و اتمی یک ماده NOAA است. یک نمونه در برابر باریکه‌ای از نوترون‌های گرمایی یا سرد قرار می‌گیرد تا الگوی پراشی به دست آید که اطلاعاتی در مورد ساختار ماده ارائه می‌دهد. این روش مشابه پراش پرتو ایکس است، اما به دلیل خواص پراکندگی متفاوتی که نوترون‌ها و پرتو ایکس دارند، اطلاعات مکمل یکدیگر را ارائه می‌دهند. این روش معمولاً به صورت پراش پودری روی پودر NOAA بس‌بلورین<sup>۲</sup> انجام می‌شود. برای بلورنگاری نوترونی در تک‌بلورها، بلور باید بسیار بزرگتر (تقریباً  $1 \text{ mm}^3$ ) نسبت به اندازه‌ای باشد که در پراش پرتو ایکس استفاده می‌شود و بنابراین، برای نانوآشیاء مناسب نیست. پراش پودری یک روش علمی با استفاده از پراش پرتو ایکس، نوترون یا الکترون بر روی نمونه‌های پودری یا میکروبلوری برای مشخصه‌یابی ساختار مواد است. پراش تک‌بلور، همانطور که از نام آن پیداست، نیاز به یک تک‌بلور از ماده دارد. اگرچه می‌توان ساختارهای بلوری را فقط از داده‌های پودری به دست آورد، اما هم‌ساختار تک‌بلور آن روش بسیار قوی‌تری برای تعیین ساختار است. پراش پودری اکثراً برای مشخصه‌یابی و شناسایی فازها استفاده می‌شود و بیشتر برای تصحیح جزئیات ساختاری که از قبل شناخته شده است به کار می‌رود تا یافتن ساختارهای ناشناخته.

#### ۱۰-۷ پراش الکترون بازتابی با انرژی بالا و انرژی پایین

روش RHEED برای مشخصه‌یابی سطح مواد بلورین استفاده می‌شود. باریکه الکترونی با انرژی  $10 \text{ keV}$  تا  $30 \text{ keV}$  با زاویه بسیار کوچکی نسبت به سطح نمونه به آن برخورد می‌کند. الکترون‌های برخوردی از اتم‌های سطح نمونه پراکنده می‌شوند و بخش کوچکی از الکترون‌های پراکنده به‌طور سازنده در زوایای خاص تداخل کرده و الگوهای منظمی را روی آشکارساز تشکیل می‌دهند. علاوه بر این، از LEED برای تعیین ساختار سطح مواد بلورین با استفاده از باریکه موازی از الکترون‌های کم‌انرژی ( $20 \text{ eV}$  تا  $200 \text{ eV}$ ) و مشاهده الکترون‌های پراشیده، استفاده می‌شود.

#### ۱۰-۸ گرماسنجی روبشی تفاضلی

گرماسنجی روبشی تفاضلی یک روش آنالیز گرمایی است که در آن تفاوت در مقدار شارش حرارت مورد نیاز برای تغییر دمای نمونه و مرجع به‌عنوان تابعی از دما اندازه‌گیری می‌شود. هم نمونه و هم مرجع در حین آزمایش تقریباً در دمای یکسانی نگهداری می‌شوند.

1- Crystallographic structure factor phase

2- Polycrystalline

مقدار کمی از نمونه (۵ mg تا ۱۰ mg) برای اندازه‌گیری DSC استفاده می‌شود. محدوده دمایی وسیعی برای این آزمون از  $-180^{\circ}\text{C}$  تا  $700^{\circ}\text{C}$  و یا از دمای اتاق تا  $1600^{\circ}\text{C}$  امکان‌پذیر است. این روش اطلاعاتی در مورد انتقال فاز، دمای انتقال شیشه‌ای، همجواری<sup>۱</sup> نانوآشیاء و تبلور ارائه می‌دهد.

#### ۹-۱۰ استانداردهای مرتبط

ISO 11357-1, Plastics - Differential scanning calorimetry (DSC) - Part 1: General principles

ISO 11357-7, Plastics - Differential scanning calorimetry (DSC) - Part 7: Determination of crystallization kinetics

#### ۱۰-۱۰ بلورنگاری<sup>۲</sup> تشدید مغناطیسی هسته حالت جامد

طیف‌های NMR از قرار گرفتن نمونه در یک میدان مغناطیسی قوی و کاوش به وسیله امواج رادیویی، به دست می‌آیند. مجموعه تشدیدهای به دست آمده آنالیز می‌شوند تا هسته‌های اتمی که در مجاورت یکدیگر قرار دارند و صورت‌بندی موضعی اتم‌هایی که به یکدیگر پیوند دارند، به دست آید.

#### ۱۱-۱۰ بلورنگاری رامان

طیف‌سنجی رامان (به زیربند ۶-۴-۱۱ مراجعه شود) برای مشاهده حالت‌های فونون ارتعاشی، چرخشی و سایر مدهای با بسامد کم یک سامانه استفاده می‌شود. پراکندگی رامان به وسیله یک بلور ناهمسانگرد برای به دست آوردن اطلاعات در مورد جهت‌گیری بلوری استفاده می‌شود. طول موج و قطبش نور پراکنده شده رامان با توجه به جهت‌گیری بلوری و نور لیزر فرودی می‌تواند برای تعیین ساختار بلوری استفاده شود.

در مورد نانولوله‌های کربنی می‌توان از طیف‌سنجی رامان همچنین برای تعیین دستوارگی یا نوع نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره، به کمک آنالیز موقعیت «حالت تنفس شعاعی<sup>۳</sup>» و شکل و شدت‌های اجزای حالت G که به دلیل ارتعاشات صفحه‌ای اتم‌های کربن ایجاد می‌شوند، استفاده کرد.

#### ۱۲-۱۰ استانداردهای مرتبط

ISO/TS 10797, Nanotechnologies - Characterization of single-wall carbon nanotubes using transmission electron microscopy

ISO/TS 10798, Nanotechnologies - Characterization of single-wall carbon nanotubes using scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectrometry analysis

ISO 13067, Microbeam analysis - Electron backscatter diffraction - Measurement of average grain size

ISO 24173, Microbeam analysis - Guidelines for orientation measurement using electron backscatter diffraction

---

1- Fusion

2- Crystallography

3- Radial breathing mode

ISO 25498, Microbeam analysis - Analytical electron microscopy - Selected area electron diffraction analysis using a transmission electron microscope

## ۱۱ اندازه‌ده‌های خواص نوری

### ۱-۱۱ کلیات

خواص نوری نانواشیاء و مواد حاوی نانواشیاء شامل خواص پودرهای خشک، هواسل‌ها در هوا، پراکنه‌های مایع، ذرات جامد روی سطوح جامد، لایه‌های نازک و مواد چندسازه‌ای می‌شود. اندازه‌ده‌ها و روش‌های مورد استفاده برای تعیین آنها به نوع مواد و محیط بستگی دارد.

### ۲-۱۱ اندازه‌ده‌ها

خواص نوری نانواشیاء، نانومواد و نانو ساختارها از برهم‌کنش اساسی نور با ماده ناشی می‌شود. اندازه‌ده‌ها در جدول ۱۳ خلاصه شده‌اند.

جدول ۱۳- اندازه‌ده‌ها برای خواص نوری

اندازه‌ده نهایی	اندازه‌ده ویژه روش	روش	محدوده	تفکیک پذیری	مراجع
رنگ بسامد پلاسمون	طیف جذب	طیف‌سنجی جذب UV-Vis-NIR	۱۷۵ nm تا ۳۳۰۰ nm	۰٫۰۵ nm تا ۰٫۲ nm وابسته به محدوده	[73]
جذب نوری	طول موج جذب‌شده	طیف‌سنجی جذب	۱۷۵ nm تا ۳۳۰۰ nm	۰٫۰۵ nm (UV) تا ۰٫۲ nm (IR)	[74]
نشر نوری	طول موج نشر شده	طیف‌سنجی نوردرخشایی	۲۷۰۰ nm تا ۴۰۰ nm	۰٫۰۵ nm (UV) تا ۰٫۲ nm (IR)	[75]
نشر نوری	طول موج نشر شده	طیف‌سنجی الکترودرخشایی	۲۷۰۰ nm تا ۴۰۰ nm	۰٫۰۵ nm (UV) تا ۰٫۲ nm (IR)	
رنگ	طول موج عبوری یا جذب‌شده	طیف‌سنجی جذب	۱۷۵ nm تا ۳۳۰۰ nm	۰٫۰۵ nm (UV) تا ۰٫۲ nm (IR)	[73]
فلورسانس	شدت	طیف‌سنج فلورسانس	طول موج ۲۰۰ nm تا ۸۵۰ nm	۵۰ fm فلورسئین <sup>۱</sup>	[75]

### ۳-۱۱ روش‌های طیف‌سنجی

تعدادی از طیف‌سنجی‌های نوری استاندارد شده را می‌توان برای ارزشیابی انتشار، طیف کامل نشری، موقعیت قله (رنگ) و عرض قله استفاده کرد. اکثر تجهیزات طیف‌سنجی نوری، نور ورودی را به اجزای طیفی تقسیم کرده و سپس شدت این اجزای طیفی را برای تعیین اطلاعات نوری اندازه‌گیری می‌کنند.

طیف‌سنجی جذب نور (UV-Vis-NIR): طیف‌سنجی جذبی به روش‌های طیف‌سنجی اطلاق می‌شود که در آنها میزان جذب تابش، به‌عنوان تابعی از بسامد یا طول موج، در اثر برهم‌کنش آن با یک نمونه اندازه‌گیری

1 - Fluorescein

می‌شود. نمونه، انرژی یا به عبارت دیگر فوتون‌ها، را از میدان تابشی جذب می‌کند. شدت جذب به صورت تابعی از بسامد تغییر می‌کند و این تغییر، طیف جذبی است. روش‌های طیف‌سنجی مختص مقیاس نانو نیستند، اما برخی از پارامترهای مقیاس نانو از قبیل ضخامت فیلم، اندازه و غلظت ذره را می‌توان از اندازه‌گیری‌های طیف‌سنجی استنباط کرد. این روش شامل هدایت باریکه‌ای از تابش به یک نمونه و آشکارسازی شدت تابشی است که از آن عبور می‌کند. از انرژی عبوری می‌توان برای محاسبه میزان جذب استفاده کرد. طیف‌سنجی جذبی می‌تواند برای مشخصه‌یابی نانومواد مانند نانولوله‌های کربنی تک دیواره یا اندازه و غلظت نقاط کوانتومی در یک پراکنه استفاده شود. در مورد نقاط کوانتومی، حالت الکترونی محصور شده در یک نقطه کوانتومی منجر به جذب و نشر بسامد کاملاً کنترل شده تابش نوری می‌شود (مقیاس طول: ۳ nm تا ۲۰ nm). در مورد مواد فوتونیک، ساختار تکرارشونده ماده منجر به تعدادی اثرات غیرخطی می‌شود (مقیاس طول: ۲۰۰ nm تا ۴۰۰ nm).

طیف‌سنجی PL (یا فلورسانس)، که طیف‌سنجی نشر نوری نیز نامیده می‌شود، پراکندگی نشر نور از یک نانوشیء تحریک شده ناشی از جذب فوتون‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. این روش، یک روش غیرتماسی غیرمخرب و برای کاوش خواص اپتو-الکترونیکی<sup>۱</sup> مواد است. نور به یک نمونه هدایت می‌شود، که در آنجا جذب شده و فرایندی به نام برانگیختگی نوری<sup>۲</sup> می‌تواند رخ دهد. برانگیختگی نوری باعث می‌شود که ماده به حالت الکترونیکی با انرژی بالاتر جهش یافته و سپس در حین واهلش<sup>۳</sup> و برگشتن به سطح انرژی پایین‌تر، انرژی (فوتون‌ها) را آزاد کند. نشر نور یا نوردرخشایی از طریق این فرآیند PL است.

الکترودرخشایی یک پدیده اپتو-الکترونیکی است که در آن یک نانوشیء زمانی که در اثر عبور جریان الکتریکی یا یک میدان الکتریکی قوی تحریک شود، نور نشر می‌کند. الکترون‌ها و حفره‌ها را می‌توان از طریق آلاییدن<sup>۴</sup> نانوشیء برای تشکیل یک اتصال p-n یا از طریق تحریک با برخورد الکترون‌های پرانرژی که به وسیله یک میدان الکتریکی قوی شتاب گرفته‌اند، از هم جدا کرد. الکترون‌ها و حفره‌های برانگیخته سپس به صورت تابشی با هم بازترکیب می‌شوند تا نور آزاد کنند و مشخصه‌یابی طیف‌سنجی نور نشر شده به عنوان طیف‌سنجی EL شناخته می‌شود.

#### ۱۱-۴ استانداردهای مرتبط

ISO/TS 10868, Nanotechnologies - Characterization of single-wall carbon nanotubes using ultraviolet-visible-near infrared (UV-Vis-NIR) absorption spectroscopy

ISO/TS 17466, Use of UV-Vis absorption spectroscopy in the characterization of cadmium chalcogenide colloidal quantum dots

---

1- Opto-electronic  
2- Photoexcitation  
3- Relaxes  
4- Doping

## ۱۲ اندازه‌ده‌های الکتریکی و الکترونیکی

### ۱-۱۲ اندازه‌ده‌ها

اندازه‌ده‌های مهم مرتبط با اندازه‌گیری‌های الکتریکی و الکترونیکی نانواشیاء عبارتند از:

الف- رسانایی ویژه<sup>۱</sup>/مقاومت ویژه<sup>۲</sup> (رسانندگی<sup>۳</sup>/مقاومت ویژه<sup>۴</sup>): عبارت است از مقاومت یا رسانایی یک نانوذره که برای حجم آن (طول و سطح مقطع عرضی) بهنجار شده‌است. رسانایی/مقاومت ویژه به‌صورت خاصیت الکتریکی ذاتی ماده در نظر گرفته می‌شود.

ب- مقاومت ورقه‌ای درون صفحه: به‌ویژه برای نانومواد دو بعدی مانند گرافن استفاده می‌شود. به‌صورت مقاومت یک سطح مربعی از ماده تعریف می‌شود.

پ- گاف نواری<sup>۵</sup>: شکاف انرژی بین نوار ظرفیت و هدایت یک نانوشیء نیم‌رسانا. گاف نواری نانواشیاء فلزی به‌صورت صفر تعریف می‌شود. گاف نواری می‌تواند مستقیم یا غیرمستقیم باشد، بدین معنا که آیا یک الکترون از نوار ظرفیت می‌تواند با یا بدون احتمال در تکانهٔ مربوطه، به نوار هدایت برانگیخته شود.

اندازه‌ده‌های مربوط به خواص الکتریکی و الکترونیکی نانواشیاء در جدول ۱۴ خلاصه شده‌است.

جدول ۱۴- اندازه‌ده‌های مربوط به اندازه‌گیری‌های الکتریکی و الکترونیکی نانواشیاء

اندازه‌ده نهایی	اندازه‌ده ویژه هر روش	روش	محدوده	تفکیک پذیری	محدودیت‌ها	مراجع
رسانایی/مقاومت ویژه (رسانندگی/مقاومت ویژه)	رسانایی/مقاومت (به همراه ابعاد ذره)	اندازه‌گیری الکتریکی دوپروبه یا چهارپروبه	مقاومت ویژه $\Omega m$ تا $10^{16} \Omega m$	$0.1 \mu\Omega.m$		[76], [77]
مقاومت ورقه‌ای درون صفحه	مقاومت (به همراه ضخامت)	پروب چهارنقطه‌ای مثال: روش واندرپاف <sup>۶</sup>	صفر (ابررسانا) تا بی‌نهایت (عایق)	$0.1 \mu\Omega$		[76], [77]
گاف نواری	شدت فوتوگسیل به صورت تابعی از زاویه	ARPES		$1 meV$		

- 1- Specific conductance
- 2- Specific resistance
- 3- Conductivity
- 4- Resistivity
- 5- Bandgap
- 6- Van der Pauw method

اندازه نهایی	اندازه ویژه هر روش	روش	محدوده	تفکیک پذیری	محدودیت‌ها	مراجع
گاف نواری	مقاومت	اندازه‌گیری مقاومت به صورت تابعی از دما	عموماً بین $0.5\text{ eV}$ تا $5\text{ eV}$	$0.1\text{ eV}$ در $300\text{ K}$	در مرحله تحقیقات	
گاف نواری	جذب نور	طیف‌سنجی جذب نور (V/Vis/IR)	عموماً بین $0.5\text{ eV}$ تا $5\text{ eV}$	$0.1\text{ eV}$ در $300\text{ K}$	نیاز به پراکنه‌های بسیار رقیق از نانواشیاء دارد، برای نانواشیاء پراکنده مجزا بهترین عملکرد را دارد.	[74]
گاف نواری	طول موج جذب/نشر نوری	طیف‌سنجی نوردرخشایی (فلورسانس)	عموماً بین $0.5\text{ eV}$ تا $5\text{ eV}$	$0.1\text{ eV}$ در $300\text{ K}$	نیاز به نانواشیاء پراکنده مجزا دارد.	[75]
گاف نواری	محل قلّه رامان که ابعاد شیء را می‌دهد.	طیف‌سنجی رامان	عموماً بین $0.5\text{ eV}$ تا $5\text{ eV}$	$0.1\text{ eV}$ در $300\text{ K}$	فقط برای نانواشیاء خاصی که رامان فعال دارند مثل نانولوله‌ها، کاربرد دارد.	

اندازه نهایی	اندازه ده ویژه هر روش	روش	محدوده	تفکیک پذیری	محدودیت ها	مراجع
گاف نواری	جریان تونل زنی	میکروسکوپی تونل زنی روشی (طیف سنجی) تونل زنی (روشی)	۰٫۱ eV تا ۵ eV تفکیک پذیری: eV در ۰٫۱ ۳۰۰ K	۰٫۱ nm	روش خلاء فوق بالا، آماده سازی خاص نمونه و زیرلایه رسانا لازم است.	[78]
رسانندگی نانومقیاس	جریان	میکروسکوپی نیروی اتمی رسانا	ناحیه روبش با ابعاد ۱۰ μm × ۱۰ μm؛ جریان ها از چند pA تا ۵۰۰ nA	۰٫۱ nm تا تقریباً ۱۰ nm	محدود به نمونه های رسانا. همچنین محدود شده با گستره روبشگر	[79]
ضریب پیزوالکتریک	بار سطح و جابجایی	میکروسکوپی نیروی پیزو	ناحیه روبش با ابعاد ۱۰ μm × ۱۰ μm؛ جریان ها از چند pA تا ۵۰۰ nA	۰٫۱ nm تا تقریباً ۱۰ nm	محدود شده با گستره روبشگر	[80]

## ۲-۱۲ روش ها

### ۱-۲-۱۲ اندازه گیری رسانایی دونقطه ای یا چهارنقطه ای

اندازه گیری رسانایی می تواند با اندازه گیری های رسانایی دونقطه ای یا چهارنقطه ای انجام گیرد. برای اندازه گیری مقاومت ورقه می توان از روش های مبتنی بر جریان گردابی غیرتماسی<sup>۱</sup> نیز استفاده کرد. در اندازه گیری های هدایت پوشش، ثابت شده است که چنین روش هایی مفید هستند. پوشش های جامد به بهترین شکل به صورت فیلم های نانومقیاس یا نانو ساختار تعریف می شوند و نه نانواشیاء که تمرکز این استاندارد روی آنها است. گاف نواری یک نانوماده را می توان با اندازه گیری مقاومت به عنوان تابعی از دما و برآزش منحنی به دست آمده، اندازه گیری کرد. همچنین می توان آن را با استفاده از جذب و نشر نوری، مانند

1- Non-contact eddy-current



طیف‌سنجی نوردرخشایی (که با عنوان طیف‌سنجی فلورسانس نیز شناخته می‌شود) و طیف‌سنجی رامان، اندازه‌گیری کرد.

#### ۲-۲-۱۲ طیف‌سنجی نورگسیل فرابنفش با تفکیک زاویه‌ای

گاف نواری را می‌توان با استفاده از روش‌های طیف‌سنجی نورگسیل مانند ARPES اندازه‌گیری کرد. طیف‌سنجی نورگسیل با تفکیک زاویه‌ای یک روش تجربی مستقیم برای مشاهده توزیع الکترون‌ها در فضای وارون<sup>۱</sup> جامدات است. با این روش می‌توان اطلاعات انرژی و تکانه یک الکترون را به دست آورد و در نتیجه اطلاعات دقیقی در مورد پراکندگی نواری<sup>۲</sup> و سطح فرمی ارائه داد.

#### ۳-۲-۱۲ میکروسکوپی تونل‌زنی روبشی

گاف نواری را می‌توان با استفاده از STS نیز اندازه‌گیری کرد که بسط‌یافته روش STM است و اطلاعاتی در مورد چگالی الکترون‌ها در نمونه به عنوان تابعی از انرژی آن‌ها ارائه می‌دهد.

روش STM مبتنی بر قابلیت قرار گرفتن یک نمونه رسانا و یک سوزن رسانای تیز در حد اتمی، در فاصله تونل‌زنی از یکدیگر است. جریان تونل‌زنی از سوزن به نمونه در صورتی که نمونه آریبی شده<sup>۳</sup> باشد، وابستگی بسیار زیادی به فاصله نمونه تا سوزن (گاف تونل‌زنی) دارد. تجهیزات موجود می‌توانند با پیش‌جریان تونل‌زنی در حین روبش سطح نمونه، چنین فاصله ثابتی را حفظ کنند. نمونه و سوزن معمولاً با استفاده از عملگرهای پیزوالکتریک نسبت به هم قرار می‌گیرند. در هر نقطه از سطح، منحنی جریان بر حسب ولتاژ (I-V) را می‌توان در حالت طیف‌سنجی به دست آورد. این روش امکان تفکیک‌پذیری زیراتمی و همچنین دستکاری اتمی (حرکت کنترل‌شده اتم‌ها روی سطح نمونه) را فراهم می‌کند.

#### ۴-۲-۱۲ میکروسکوپی نیروی اتمی رسانا

روش AFM رسانا نوعی از AFM است (به زیربند ۶-۶-۳ مراجعه شود) که هدایت الکتریکی موضعی و همچنین تصویر توپوگرافی نمونه را ثبت می‌کند. برای حصول اندازه‌گیری رسانایی در مقیاس نانو، یک سوزن پروب رسانا، برای مثال یک تیرک از جنس سیلیکون یا سیلیکون نیتريد با پوششی از مواد رسانا مانند طلا یا الماس، موردنیاز است. رسانایی به صورت جریانی که بین سوزن و سطح نمونه در یک آریبی ثابت شارش می‌کند، اندازه‌گیری می‌شود. جریان‌های  $10^{-12}$  A تا  $10^{-6}$  A ممکن است به سوزن اعمال شود. مرز پایین جریان به وسیله سطح نوفه در سامانه دیکته می‌شود. در نقاط خاص موردنظر، منحنی‌های موضعی I به V را می‌توان در یک حالت طیف‌سنجی اندازه‌گیری کرد.

1- Reciprocal space  
2- Band dispersion  
3- Biased

## ۱۲-۲-۵ میکروسکوپی نیروی پیزو

پیزوالکتریسیته توانایی یک ماده برای تولید بار الکتریکی بر اثر تغییر شکل مکانیکی و یا ایجاد تغییر شکل مکانیکی در اثر اعمال یک میدان الکتریکی است. ارتباط بین میدان الکتریکی و افزایش طول مکانیکی با عنوان ضریب پیزوالکتریک شناخته می‌شود که یک اندازه‌ده اصلی برای این دسته از مواد است. موادی که خاصیت پیزوالکتریک دارند عموماً سرامیک‌ها یا چندسازه‌هایی هستند که به صورت فیلم نازک استفاده می‌شوند. سه نوع متفاوت از ضریب پیزوالکتریک بسته به جهت‌گیری نیروی اعمالی و محور پیزوالکتریک شناخته شده است: اثر عرضی (که در آن یک نیرو در امتداد یک محور خنثی (y) اعمال می‌شود و بارها در امتداد جهت (x) تولید می‌شوند)، اثر طولی (که در آن بارها در همان جهت x که نیروها اعمال شده آزاد می‌شوند) و اثر برشی.

سه روش اندازه‌گیری اصلی برای مشخصه‌یابی ضریب پیزوالکتریک وجود دارد: روش بسامد، روش تداخل‌سنجی<sup>۱</sup> لیزری و روش شبه‌ایستا<sup>۲</sup>. در اکثر روش‌ها یک پتانسیل به نمونه موازی با یک خازن صفحه‌ای یا سایر پیکربندی‌ها، اعمال و تغییر طول اندازه‌گیری می‌شود. تنها روشی که قادر به دستیابی به تفکیک‌پذیری فضایی در مقیاس نانو است، مبتنی بر روش AFM رسانا است که به عنوان PFM شناخته می‌شود. همچنین می‌توان از این روش برای تصویربرداری از شاخصه‌های نانومقیاس حوزه‌ها در لایه‌های نازک پیزوالکتریک و کاوش پارامترهای پیزوالکتریک موضعی، استفاده کرد.

## ۱۳ اندازه‌ده‌های مغناطیسی

## ۱-۱۳ کلیات

نانواشیاء مغناطیسی که در برخی جوامع علمی با عنوان «نانومغناطیس‌ها» شناخته می‌شوند، خواص خود را از سهم خواص مغناطیسی کلاسیک (توده‌ای) میدان مغناطیس‌زدا<sup>۳</sup> و نیروی نظم‌دهنده مغناطیسی که به نام «برهم‌کنش تبدالی<sup>۴</sup>» نیز شناخته می‌شود، به دست می‌آورند. مورد دوم از فرآیندهای مکانیک کوانتومی سرچشمه گرفته و فقط در محدوده کوتاه‌برد طول تبدالی قدرتمند است.

مشابه سایر اندازه‌ده‌ها، روش‌هایی مانند میکروسکوپی پروبی وجود دارد که می‌تواند به خواص مغناطیسی توزیع‌شده فضایی دسترسی پیدا کند و برخی روش‌ها اندازه‌گیری توده (میانگین فضایی)<sup>۵</sup> یک خاصیت را انجام می‌دهند. اندازه‌ده‌های میانگین‌گیری‌شده فضایی مانند مغناطش خالص، دمای کوری، وادارندگی<sup>۶</sup> و موارد دیگر، اغلب برای صنعت بسیار مفید هستند و روش‌های اندازه‌گیری غیراختصاصی نانو محسوب می‌شوند. لازم به ذکر است که در برخی از کاربردها، ورود نانواشیاء مغناطیسی به یک زمینه غیرمغناطیسی مانند پلاستیک یا سرامیک، خاصیت ویژه‌ای را اضافه می‌کند اما ممکن است نیازی به تفکیک‌پذیری فضایی بالا نداشته باشد.

- 
- 1- Interferometry
  - 2- Quasi-static method
  - 3- Demagnetising field
  - 4 - Exchange interaction
  - 5- Spatially averaged
  - 6- Coercivity

۲-۱۳ اندازه‌ده‌ها

خلاصه‌ای از اندازه‌ده‌های مرتبط در جدول ۱۵ نشان داده شده‌است.

جدول ۱۵- اندازه‌ده‌های مربوط به خواص مغناطیسی مواد نانوچندسازه‌ای جامد

اندازه‌ده نهایی	اندازه‌ده ویژه هر روش	روش	محدوده	تفکیک پذیری	محدودیت‌ها	مراجع
مغناطش اشباع	امپدانس (رهبندی) القایی	اندازه‌گیری مدار RLC برای جزء القایی مدار. VSM و AGFM می‌توانند برای این اندازه‌گیری استفاده شوند.	$\frac{1}{2} MA/m < H_{max} < 4 MA/m$ $m_{max}: 1 Am^2$	H: ۰/۱ kA/m M: $1 \cdot 10^{-9} Am^2$	لازم است حجم نمونه مشخص باشد.	[81], [82], [83]
دمای کوری	تغییر پذیرفتاری مغناطیسی یا مغناطیسی شدن یا انرژی نشر یافته	اثر مغناطیسی-نوری کُر با کنترل دما مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش به وسیله DCS با کنترل دما	$2/2 K < T < 500 K$	از ۰/۱ K تا $\pm 1 K$ بسته به پایداری کنترل دمایی	اندازه‌گیری‌های مغناطیس‌سنجی نیاز به تغییرات آهسته دمایی دارد. DSC با تغییرات بسیار کم گرمایی محدود می‌شود.	[81], [82], [83], [84]
دمای کوری	میدان فوق‌ریز	طیف‌سنجی موسبائر	$2/2 K < T < 500 K$	از ۰/۱ K تا $\pm 1 K$ بسته به پایداری کنترل دمایی	فقط برای ایزوتوپ‌های بسیار خاص استفاده می‌شود. می‌تواند برای تعیین دمای نیل (دمایی که بالاتر از آن ماده فرومغناطیس به پارامغناطیس تبدیل می‌شود) هم به کار رود.	[85], [86]
پذیرفتاری مغناطیسی	شیب مغناطش بر حسب قدرت میدان مغناطیسی (M-H)	اندازه‌گیری مدار RLC برای جزء القایی مدار. از VSM و AGFM می‌توان برای اندازه‌گیری استفاده کرد.	$\frac{1}{2} MA/m < H_{max} < 4 MA/m$ $m_{max}: 1 Am^2$	H: ۰/۱ kA/m M: $1 \cdot 10^{-9} Am^2$	این یک روش اندازه‌گیری توده‌است.	[81], [82], [83]

اندازه نهایی	اندازه ویژه هر روش	روش	محدوده	تفکیک پذیری	محدودیت‌ها	مراجع
مغناطش سطح	نیروی چرخشی کر (Kerr) و نیروی محرکه بیضایی اثر هال که مستقیماً با میدان مغناطیسی سرگردان مرتبط است.	MFM MOKE مغناطیس سنج روبشی اثر هال	معمولاً میدان با قدرت (H) کم (تا ۰/۳ تسلا)	محدود شده به سوزن. محدود شده به تفکیک پذیر نوری. ۵٪ تا ±۳٪.	میدان سوزن می‌تواند نمونه را تغییر داده و فقط اطلاعاتی درباره میدان‌های سرگردان بدهد. فقط می‌تواند عمقی از نمونه را که متناسب با عمق لیزر (نور) در پوست است را کاوش کند. اطلاعاتی راجع به میدان‌های سرگردان می‌دهد.	[79], [80], [83], [87]
میدان وادارنده <sup>۱</sup>	سیگنال القایی، چرخش کر (برای MOKE)	مغناطیس‌سنجی القایی یا مغناطیس‌سنجی نوری که امکان اشباع کامل ماده را فراهم می‌کند.	۱/۲ MA/m < H <sub>max</sub> < ۴ MA/m m <sub>max</sub> : ۱ Am <sup>2</sup>	H: ۰/۱ kA/m M: ۱۰ <sup>-۹</sup> Am <sup>2</sup>		[79], [80]
ترکیب فاز مغناطیسی	تغییر ایزومر	طیف‌سنجی موسباتر	صفر تا ۱۰۰٪ (نسبی)	حدود ۱٪	به ایزوتوپ‌های بسیار ویژه عناصر خاص، مانند آهن، محدود می‌شود.	[85], [86]

### ۳-۱۳ روش‌ها

#### ۱-۳-۱۳ افزاره تداخل کوانتومی ابررسانا<sup>۲</sup>

افزاره تداخل کوانتومی ابررسانا یک مغناطیس‌سنج بسیار حساس است که میدان‌های مغناطیسی بسیار کوچک را براساس اتصالات جوزفسون<sup>۳</sup> اندازه می‌گیرد. دو نوع اصلی SQUID وجود دارد: DC و RF. افزاره‌های تداخل کوانتومی ابررسانا RF فقط می‌توانند با اتصالات جوزفسون کار کنند که باعث می‌شود ارزانتر ولی دارای حساسیت کمتری باشند.

یادآوری - محدودیت اندازه‌گیری میدان مغناطیسی برای روش SQUID برابر  $T \times 10^{-18} \times 5$  است.

1- Coercive field

2- Superconducting quantum interference device

3- Josephson junctions

### ۱۳-۳-۲ مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی

مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی، میزان مغناطش نمونه ماده مغناطیسی را که در یک میدان مغناطشگر<sup>۱</sup> قرار دارد و به‌طور سینوسی نوسان می‌کند، از طریق تبدیل میدان دوقطبی نمونه به سیگنال الکتریکی جریان متناوب، اندازه می‌گیرد.

یادآوری - محدودیت اندازه‌گیری میدان مغناطیسی برای روش VSM برابر  $10^{-17}$  emu است.

### ۱۳-۳-۳ طیف‌سنجی موسبائر<sup>۲</sup>

طیف‌سنجی موسبائر یک روش طیف‌سنجی مبتنی بر اثر موسبائر است که شامل جذب و نشر تشدید بدون پس‌زنی<sup>۳</sup> پرتوهای گاما در جامدات می‌باشد. طیف‌سنجی موسبائر تغییرات کوچک سطوح انرژی یک هسته اتمی را در پاسخ به محیط آن کاوش می‌کند. سه نوع از برهم‌کنش‌های هسته‌ای در طیف‌سنجی موسبائر مشاهده می‌شود: یک جابه‌جایی ایزومر که به‌عنوان جابه‌جایی شیمیایی هم شناخته می‌شود؛ شکافتگی چهارقطبی؛ و شکافتگی مغناطیسی یا فوق‌ریز که به‌عنوان اثر زیمان<sup>۴</sup> نیز شناخته می‌شود. طیف‌سنجی موسبائر از نظر حساسیت به تغییرات کوچک در محیط شیمیایی هسته از جمله تغییرات حالت اکسایش، تأثیر لیگاندهای مختلف بر یک اتم خاص و محیط مغناطیسی نمونه، منحصر به فرد است. فقط ایزوتوپ‌های خاصی از عناصر خاص برای طیف‌سنجی موسبائر مناسب هستند که شامل  $^{57}\text{Fe}$ ،  $^{129}\text{I}$ ،  $^{119}\text{Sn}$  و  $^{121}\text{Sb}$  می‌شوند.

### ۱۳-۳-۴ طیف‌سنجی تشدید پارامغناطیسی الکترون

طیف‌سنجی EPR یا ESR روشی برای مطالعه مواد با الکترون‌های غیرجفت‌شده است. مجموعه‌ای از مراکز پارامغناطیس، مانند رادیکال‌های آزاد، تحت تابش امواج میکروویو با بسامد ثابت قرار می‌گیرند. زمانی که شکافتگی اسپین تحت میدان مغناطیسی خارجی با انرژی میکروویو منطبق می‌شود، جذب تقویت‌یافته رخ می‌دهد. مشتق‌گیری از طیف جذب رایج‌ترین راه برای ثبت و ارائه طیف EPR است.

### ۱۳-۳-۵ خاصیت مغناطیسی-نوری کر

روش MOKE چرخش نور قطبیده منعکس شده از سطح یک نمونه مغناطیسی را اندازه‌گیری می‌کند.

یادآوری - اندازه‌گیری‌های MOKE معمولاً به تغییرات بازتابی کوچک‌تر از ۰/۰۲٪ و تغییرات قطبش کوچک‌تر از ۰/۰۰۵ درجه محدود می‌شوند.

در روش MOKE روبشی، نیاز به یک میکروسکوپ نوری با امکان آنالیز قطبش است. این روش، تباین تصویر مربوط به جهت مغناطش روی سطح نمونه را نشان می‌دهد. این روش به‌وسیله تفکیک‌پذیری نوری

1- Magnetizing filed  
2- Mössbauer spectroscopy  
3- Recoil-free  
4- Zeeman Effect

میکروسکوپ محدود می‌شود، اما استفاده از MOKE بدون درپچه و دارای قابلیت روبش می‌تواند این تفکیک‌پذیری را افزایش دهد. معمولاً محدوده روبش  $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$  استفاده می‌شود. تفکیک‌پذیری فضایی حدود  $50\text{ nm}$  قابل دستیابی است.

### ۱۳-۳-۶ میکروسکوپی نیروی مغناطیسی

روش MFM نوعی از AFM است (به زیربند ۶-۶-۳ مراجعه شود) که در آن سوزن، دارای یک گشتاور مغناطیسی قوی است که با میدان مغناطیسی نمونه برهم‌کنش دارد. روش MFM میدان‌های سرگردان<sup>۱</sup> نمونه را تشخیص داده و انحراف تیرک را ثبت می‌کند. نیروی وارد بر سوزن با شیو میدان پراکنده متناسب است و می‌تواند آن را با استفاده از تعدادی مفروضات میکرومغناطیسی به مغناطش سطح تبدیل کند. محدوده روبش تقریباً  $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$  با وضوح ویژه تقریباً  $10\text{ nm}$  است. محدودیت‌ها به برهم‌کنش سوزن با نمونه مرتبط هستند به‌طوری‌که مغناطش نمونه ممکن است در حضور سوزن تغییر کند. اندازه‌گیری‌ها اغلب در هوا و در دمای اتاق انجام می‌شوند.

### ۱۳-۳-۷ میکروسکوپی روبشی اثر هال

یک حسگر مغناطیس‌سنج اثر هال می‌تواند یک سطح مغناطیسی را روبش کند تا توزیع میدان مغناطیسی در مجاورت سطح به‌دست آید. سیگنال به‌دست آمده متناسب با شدت میدان است و می‌تواند به حالت مغناطش سطح تبدیل شود. تفکیک‌پذیری جانبی این روش شدیداً به طراحی و اندازه بستگی دارد.

### ۱۳-۳-۸ میکروسکوپی تونل‌زنی روبشی اسپین قطبیده

میکروسکوپی تونل‌زنی روبشی اسپین قطبیده نوعی از STM است (به زیربند ۱۲-۲-۳ مراجعه شود) که در آن سوزن STM یک قطبش مغناطیسی خالص در راس تیز خود در ابعاد اتمی دارد. این امر منجر به یک جریان تونل‌زنی اسپین-قطبیده می‌شود که بین سوزن و نمونه طی زمان، جریان دارد. اگر مغناطش نمونه در جهت مشابه باشد، احتمال تونل‌زنی بیشتر از حالتی است که مغناطش در جهت غیرموازی باشد. علاوه بر توپوگرافی، قطبش مغناطیسی موضعی (یا در واقع احتمال تونل‌زنی اسپین-قطبیده) با STM با تفکیک‌پذیری ویژه، نقشه‌برداری می‌شود. برای اکثر سامانه‌ها، SP-STM تحت خلاء فوق‌بالا (کمتر از  $10^{-5}\text{ Pa}$  ( $10^{-7}\text{ mbar}$ )) و در دمای پایین (زیر  $66\text{ K}$ ) کار می‌کند.

### ۱۳-۳-۹ استانداردهای مرتبط

استاندارد ملی ایران، شماره ۶-۹۸۱۹: سال ۱۳۹۱، کمیت‌ها و یکاها- قسمت ۶- الکترومغناطیس

ASTM A342/A342M-14, Standard Test Methods for Permeability of Weakly Magnetic Materials [88]

1- Stray fields

## ۱۴ اندازه‌دهی گرمایی

### ۱-۱۴ اندازه‌دهی‌ها

مواد حاوی نانواشیاء و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آن‌ها می‌توانند خواص گرمایی ویژه‌ای داشته باشند که از افزودن نانواشیاء به زمینه چندسازه یا از لایه‌بندی و تولید فیلم نازک حاصل می‌شوند. در برخی موارد، رسانندگی گرمایی مواد را می‌توان با افزودن نانولوله‌های کربنی یا ظرفیت گرمایی را از طریق افزودن نانواشیاء، افزایش داد. انبساط گرمایی مواد چندسازه نیز ممکن است به وسیله مواد افزودنی مناسب کنترل شود. بنابراین، اندازه‌دهی‌های بحرانی برای چندسازه‌های جامد حاوی نانواشیاء و کلوخه‌ها و انبوهه‌های آن‌ها عبارتند از رسانندگی گرمایی، ظرفیت گرمایی ویژه و انبساط گرمایی. در برخی حیطه‌ها، «پخشایی گرمایی»<sup>۱</sup> و «نفوذپذیری گرمایی»<sup>۲</sup> نیز به عنوان اندازه‌دهی‌های اولیه که می‌توانند سه کمیت دیگر را بدهند، در نظر گرفته می‌شوند.

این اندازه‌دهی‌ها در جدول ۱۶ خلاصه شده‌اند.

جدول ۱۶- اندازه‌دهی‌های مربوط به خواص گرمایی

اندازه نهایی	اندازه ویژه و روش	روش	محدوده	تفکیک پذیری	محدودیت‌ها	مراجع
ظرفیت گرمایی	ظرفیت گرمایی ویژه [J/(K kg)]	گرماسنجی و DSC	از دمای اتاق تا ۱۵۰۰ °C	۱ μm > بسته به نرخ گرمایش	مقدار زیادی نمونه مورد نیاز است.	
رسانندگی گرمایی تفکیک فضایی	رسانایی گرمایی [W/(m K)]	SThM	گستره روبش: ۱۰۰ μm × ۱۰۰ μm	۵۰ nm تا ۱۰۰ nm برای تفکیک پذیری عرضی، تفکیک پذیری پروب T < ۰٫۱ °C	تعیین حجم تماس سوزن-نمونه (گرمایش) دشوار است.	[89]

**یادآوری** - اندازه‌گیری‌های گرمایی نانویژه نیستند. برای بسیاری از اندازه‌گیری‌های گرمایی رایج مورد استفاده خواص نانوبهبود<sup>۳</sup> (مانند ظرفیت حرارتی بالا)، به متون اندازه‌شناسی متداول مراجعه شود [85].

1- Thermal diffusivity  
2- Thermal effusivity  
3- Nano-enhanced

## ۲-۱۴ روش‌ها

### ۱-۲-۱۴ اندازه‌گیری ظرفیت حرارتی ویژه

ظرفیت حرارتی ویژه در جامدات به توانایی ماده در ذخیره گرما اشاره دارد. ظرفیت حرارتی ویژه را می‌توان با تعدادی از روش‌های مواد توده مانند گرماسنجی و DSC اندازه‌گیری کرد (به زیربند ۷-۳-۲ مراجعه شود).

### ۲-۲-۱۴ میکروسکوپی گرمایی روبشی

میکروسکوپی پروب گرمایی روبشی ترکیبی از تفکیک‌پذیری فضایی، تصویربرداری و اندازه‌گیری موضعی دما و رسانندگی گرمایی را ارائه می‌دهد. میکروسکوپی گرمایی روبشی از روش میکروسکوپی پروبی روبشی برای حصول تفکیک‌پذیری ویژه بالا در حد تک‌ذره از طریق روبش یک پروب روی نمونه، استفاده می‌کند. توپوگرافی نمونه و همچنین اندازه‌گیری موضعی دما و هدایت گرمایی ممکن است به‌دست آید. دمای موضعی ممکن است به‌وسیله یک اتصال گرماجفت<sup>۱</sup> در سوزن پروب و پروب‌های مقاومتی یا تفسنجی<sup>۲</sup>، که در آن دمای پروب با یک مقاومت فیلم نازک در سوزن پروب کنترل می‌شود، پایش شود. از آنجائی‌که سوزن در تماس مستقیم با نمونه قرار می‌گیرد، گرما به نمونه شارش می‌یابد و رسانندگی گرمایی را می‌توان تعیین کرد. این امر تفکیک‌پذیری جانبی (عرضی) بالایی از رسانندگی گرمایی را با توانایی همبستگی توپوگرافی و اطلاعات گرمایی، می‌دهد.

لازم به ذکر است که تبادل حرارت بین سوزن و نمونه ممکن است با تماس مستقیم (جامد-جامد)، که منجر به نقشه‌برداری رسانندگی می‌شود، از طریق همرفت<sup>۳</sup> مایع سطح نمونه و سوزن (جامد-مایع) و همرفت هوا (گاز-جامد) انجام گیرد. گستره روبش این روش به مرحله روبش مورد استفاده بستگی دارد و از مرتبه  $100\ \mu\text{m}$  در  $100\ \mu\text{m}$  است. دقت دمایی کمتر از  $0.1\ ^\circ\text{C}$  ممکن است به‌دست آید.

### ۳-۱۴ استانداردهای مرتبط

ISO 11357-7, Plastics - Differential scanning calorimetry (DSC) - Part 7: Determination of crystallization kinetics

### ۱۵ سایر اندازه‌دهی‌های مربوط به عملکرد

#### ۱-۱۵ کلیات

سایر اندازه‌دهی‌های مربوط به عملکرد برای مشخصه‌یابی نانوآشیاء به شکل‌های مختلف در بند ۱۵ به تفصیل توضیح داده شده‌اند. این اندازه‌دهی‌ها گرد و غبار، حلالیت و قابلیت پراکنش‌پذیری و خواص مکانیکی را پوشش می‌دهند.

---

1- Thermocouple junction  
2 - Bolometer  
3- Convection



۱۵-۲ پودرها- گرد و غبار

۱۵-۲-۱ اندازه‌ده‌ها

گردوغبار یک ویژگی ذاتی فیزیکی یا شیمیایی تعریف شده یک پودر نیست. گرد و غبار به‌عنوان «تمایل یک ماده برای تولید گردوغبار هوابرد در حین کار با آن» [86] تعریف شده‌است. گردوغبار به عوامل متعددی از جمله مشخصه‌های فیزیکی پودرها [به‌عنوان مثال شکل‌های (پودر، گرانول‌ها، قرص‌ها) و محتوی رطوبت]، خواص فیزیکوشیمیایی ذرات موجود در پودر (مانند اندازه و شکل، مساحت سطح، نوع پوشش، خواص آبدوستی و آبگریزی، انبوهش ذرات)، محیط (به‌عنوان مثال رطوبت، دما)، نوع تولید هواسل (انرژی فعال‌سازی یا انرژی ورودی) و برهم‌کنش بین ذرات در حین هم‌زدن پرتلاطم<sup>۲</sup> (مانند برش اصطکاکی، نیروهای واندروالس) بستگی دارد. بنابراین، مقادیر متفاوتی ممکن است با روش‌های آزمون مختلف به‌دست آیند.

خلاصه‌ای از اندازه‌ده‌های مربوط به گرد و غبار در جدول ۱۷ ارائه شده است.

جدول ۱۷- اندازه‌ده‌های مربوط به گرد و غبار

اندازه‌ده نهایی	اندازه‌ده ویژه هر روش	روش	محدوده	تفکیک‌پذیری	محدودیت‌ها	مراجع
مقادیر گرد و غبار بر حسب تعداد ذرات، توزیع اندازه ذرات (قطر) آئرودینامیکی معادل یا قطر تحرک‌پذیری الکتریکی) و ریخت‌شناسی. مقادیر گرد و غبار بر حسب کسرهای جرمی بیولوژیکی (قابل استنشاق، مربوط به ففسه سینه و قابل تنفس) همانگونه که در EN 481 تعریف شده است.	مثال‌ها: روش استوانه چرخشی، روش قطره مداوم، روش استوانه چرخان کوچک، ورتکس <sup>۳</sup> (استانداردهای در دست تدوین)	چند نانومتر تا $\approx 10 \mu\text{m}$ برای مقادیر گرد و غبار بر حسب تعداد ذرات، توزیع اندازه ذرات و ریخت‌شناسی. برای مقادیر گرد و غبار بر حسب کسر جرمی که در EN 481 تعریف شده است.	بستگی به روش‌ها و کارکرد دستگاهی اندازه‌گیر ی دارد.	روش‌های جرمی مرتبط زیست شناختی بر اساس EN 15051-1، EN 15051-2 و EN 15051-3 استاندارد شده‌اند. استانداردهای روش‌های غیر وزن‌سنجی در دست تدوین است.	EN 481 EN 15051-1 EN 15051-2 EN 15051-3	

1- Pellets  
2- Agitation  
3- Vortex shaker

۱۵-۲-۲ استانداردهای مرتبط

EN 481:1993, Workplace atmospheres - Size fraction definitions for measurement of airborne particles

EN 15051-1:2013, Workplace exposure - Measurement of the dustiness of bulk materials - Part 1: Requirements and choice of test methods

EN 15051-2:2016, Workplace exposure - Measurement of the dustiness of bulk materials - Part 2: Rotating drum method

EN 15051-3:2013, Workplace exposure - Measurement of the dustiness of bulk materials - Part 3: Continuous drop method

۱۵-۳ پراکنه‌های مایع

۱۵-۳-۱ اندازه‌دهها

این دسته از مواد به‌عنوان تعلیقه‌های نانوآشیاء جامد در مایعات نیز شناخته می‌شوند. وجود نانوآشیاء می‌تواند خواص مکانیکی، گرمایی، الکتریکی یا نوری مایع را تغییر دهد. در زیربند ۱۵-۳، حالت و پایداری پراکنه مهم است و ماهیت زمانی پراکنه است. اندازه‌دهها در جدول ۱۸ خلاصه شده‌اند.

جدول ۱۸- اندازه‌دههای مربوط به خواص تعلیقه‌های نانوآشیاء در مایعات

اندازه‌ده نهایی	اندازه‌ده ویژه هر روش	روش	محدوده	تفکیک پذیری	محدودیت‌ها	مراجع
گرانروی	گرانروی (Pa s)	گرانروی سنج <sup>۱</sup>	$0.1 \text{ Pa s} < \eta$ $< 10000 \text{ Pa s}$	درستی $\pm 1\%$ گستره کامل	گرانروی سنج دیسک دوار به مقادیر زیاد نمونه نیاز دارد.	ISO 3219-1 ISO 3219-2
گرانروی	گرانروی (Pa s) رفتار گران‌رو کشسان: مدول ذخیره‌سازی و مدول اتلاف (Pa)	شارش سنج <sup>۲</sup>	$0.1 \text{ Pa s} < \eta$ $< 10000 \text{ Pa s}$	درستی $\pm 1\%$ مقدار اندازه‌گیری شده فعلی		ISO 3219-1 ISO 3219-2
قابلیت پراکنش پذیری	شدت عبور داده شده و منعکس شده	SMLS	اندازه ۱۰ nm تا ۱۰۰۰ μm کسر حجمی ۰/۰۱٪ تا کسر حجمی ۹۵٪ غلظت.	۵٪ میانگین اندازه ذرات	به مقداری کالیبراسیون مستقل نیاز دارد و فقط میانگین اندازه ذره یا غلظت ذره را می دهد.	ISO/TS 21357

1 - Viscometer

2 - Rheometer

### ۱۵-۳-۲ گرانروی

#### ۱۵-۳-۲-۱ مرور کلی

گرانروی یک مایع اغلب تابعی از دما و سایر عوامل خارجی است. تعلیقه نانواشیاء در مایع ممکن است رفتار پیچیده‌تری داشته باشد که منجر به تغییر در گرانروی می‌شود. به‌عنوان مثال، اگر پودر ریزی از مواد مغناطیسی (مانند آهن یا  $Fe_2O_3$ ) در روغن یا آب پراکنده شود، مایع ترکیبی ممکن است دارای گرانروی‌ای باشد که به‌صورت تابعی از میدان مغناطیسی اعمال شده خارجی تغییر می‌کند. چنین سیالی به نام فروسیال نیز شناخته می‌شود.

در بیشتر موارد عملی، گرانروی یک پراکنه دقیقاً به همان روش یک مایع خالص اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین، اثر نانواشیاء پراکنده را می‌توان با روش‌های تثبیت‌شده‌ای مانند گرانروی‌سنج چرخشی، اصل موئینگی گرانشی، روش گوی چرخان و شارش‌سنج به‌دست آورد. لازم به ذکر است که هیچ‌یک از این روش‌ها مختص اندازه‌گیری‌های نانومقیاس نیستند، اما معمولاً برای تعلیقه‌های پیچیده نانومواد استفاده می‌شوند. یکاهای گرانروی، پاسکال در ثانیه ( $Pa \cdot s = kg/(s \cdot m)$ ) است.

#### ۱۵-۳-۲-۲ گرانروی سنج چرخشی

این نوع گرانروی‌سنج از یک فنجان پرشده از نمونه و چرخک آزمون<sup>۱</sup> تشکیل شده‌است. در بیشتر موارد، چرخک چرخانده می‌شود (اصل سرل<sup>۲</sup>). ISO 3219-1 و ISO 3219-2 را می‌توان برای تعلیقه‌های حاوی NOAA اعمال کرد، اگرچه آنها برای استفاده برای همه مایعات گرانرو نوشته شده باشند.

#### ۱۵-۳-۲-۳ اصل موئینگی وزنی<sup>۳</sup>

سرعت شارش یک مایع گرانرو از درون یک لوله عمودی یا موئینه تحت نیروی گرانش را می‌توان برای تعیین گرانروی مایع استفاده کرد. این روش اغلب برای بسپارها و نمونه‌های زیستی استفاده می‌شود. این روش دارای مزیت کوچک‌سازی تا اندازه نمونه‌های نانولیتری می‌باشد. با لوله‌هایی به قطر  $30 \mu m$  تا  $300 \mu m$  و زمان اندازه‌گیری از مرتبه  $100 s$ ، می‌توان به درستی<sup>۳</sup> درصد در اندازه‌گیری‌ها دست یافت.

#### ۱۵-۳-۲-۴ اصل گوی چرخان یا آفتان<sup>۴</sup>

روش گوی چرخان از کشش جاذبه روی گویی که از درون لوله پرشده از نمونه در حرکت است، استفاده می‌کند. لوله ممکن است در یک زاویه نسبت به عمود باشد که اجازه می‌دهد کشش را تغییر داد. گرانروی‌سنج‌های گوی چرخان پیشرفته بین  $5^\circ C$  تا  $100^\circ C$  کار می‌کنند و می‌توانند برای نمونه‌هایی از

1- Testing bob

2- Searle principle

3- Gravimetric capillary principle

4- Rolling or falling ball principle

۵ mPa.s تا ۱۰۰۰۰ mPa.s با حجم‌های حدود ۱۰۰  $\mu$ l اعمال شوند. زمان‌های اندازه‌گیری از مرتبه ده‌ها ثانیه است.

### ۱۵-۳-۲-۵ شارش‌سنجی

هدف شارش‌سنجی به‌طور کلی آزمون خواص سیالات در پاسخ به فشار اعمالی است. شارش‌سنجی اغلب برای مایعاتی استفاده می‌شود که نمی‌توان آنها را با یک مقدار گرانشی توصیف کرد (به‌عنوان مثال، تعلیقه‌های پیچیده، دوغاب<sup>۱</sup>). مایعات با مقادیر گرانشی از ۱ mPa s تا ۱۰۰ Pa s ممکن است مورد مطالعه قرار گیرند. برخی از شارش‌سنج‌ها از فناوری میکروسیال استفاده می‌کنند که به حجم‌های نمونه به کمی ۱۰۰  $\mu$ l با درستی  $\pm 2\%$  و تکرارپذیری  $\pm 0.5\%$  از مقدار اندازه‌گیری شده فعلی نیاز دارد. محدوده دمایی برای چنین اندازه‌گیری‌هایی تقریباً  $20^\circ\text{C}$  تا  $65^\circ\text{C}$  است. محدوده دماهای بزرگتر تا  $500^\circ\text{C}$  تحت شرایط نیرو (یا فشار) بالا یا سرعت برشی بالا، یا هر دو، به‌صورت تجاری در دسترس هستند.

### ۱۵-۳-۲-۶ استانداردهای مرتبط

ISO 1628-1, Plastics - Determination of the viscosity of polymers in dilute solution using capillary viscometers - Part 1: General principles

ISO 2884-1, Paints and varnishes - Determination of viscosity using rotary viscometers - Part 1: Cone-and-plate viscometer operated at a high rate of shear

ISO 2884-2, Paints and varnishes - Determination of viscosity using rotary viscometers - Part 2: Disc or ball viscometer operated at a specified speed

ISO 3219-1, Rheology - Part 1: Vocabulary and symbols for rotational and oscillatory rheometry

ISO 3219-2, Rheology - Part 2: General principles of rotational and oscillatory rheometry

ISO 4575, Plastics - Poly(vinyl chloride) pastes - Determination of apparent viscosity using the Severs rheometer

ISO 6721-10, Plastics - Determination of dynamic mechanical properties - Part 10: Complex shear viscosity using a parallel-plate oscillatory rheometer

ISO 11443, Plastics - Determination of the fluidity of plastics using capillary and slit-die rheometers

ISO 12058-1, Plastics - Determination of viscosity using a falling-ball viscometer - Part 1: Inclined-tube method

ISO 13145, Rubber - Determination of viscosity and stress relaxation using a rotorless sealed shear rheometer

ISO 16790, Plastics - Determination of drawing characteristics of thermoplastics in the molten state

---

1- Slurry

ISO/TS 21357, Nanotechnologies - Evaluation of the mean size of nano-objects in liquid dispersions by static multiple light scattering (SMLS)

### ۱۵-۳-۳ قابلیت پراکنش پذیری

پراکنش نانواشیاء در یک مایع اغلب از نظر یکنواختی یا پایداری ارزیابی می‌شود. نانواشیاء تمایل به انبوهه شدن و سپس لخته شدن یا رسوب‌دهی دارند. برای فرموله کردن محصولی که به یکنواختی چنین پراکنش‌های در طی زمان یا سایر شرایط (مانند دما) بستگی دارد، پارامتر پراکنش‌پذیری بسیار مهم است.

تعدادی روش برای تعیین یکنواختی و پایداری زمانی پراکنه موجود است. یکی از روش‌ها، پراکنندگی ایستای نور چندگانه است که امکان آزمون پراکنه‌های بسیار متراکم (پراکنه‌های رقیق نشده) را فراهم می‌کند و می‌تواند میانگین اندازه ذرات و همچنین غلظت ذرات را به‌عنوان تابعی از زمان و موقعیت در ظرف آزمون فراهم آورد.

پراکنندگی ایستای نور چندگانه مبتنی بر اصل پراکنندگی ایستای نور است که در محیط‌های غلیظ به‌کار می‌رود. این روش شامل پراکنندگی متوالی تابش در محیط پراکنده‌کننده است. در نمونه‌های غلیظ، نور فرودی به‌طور متوالی بارها پراکنده می‌شود و در نتیجه به سرعت حافظه جهت تابش فرودی<sup>۱</sup> را از دست می‌دهد. شدت نور چندپراکنده<sup>۲</sup> به طول موج نور نشریافته، غلظت ذرات، اندازه ذرات، ضریب شکست فاز پیوسته و پراکنده، قابلیت جذب و موقعیت حسگر بستگی دارد.

یادآوری - تلفیقی از روبش عمودی و گردآوری‌های متعدد از ارتفاع نمونه، ثبت ناهمگونی‌های محلی نمونه، حالت پراکنه و تکامل زمانی آن (پایداری فیزیکی) را امکان‌پذیر می‌سازد.

در این روش نیازی به آماده‌سازی نمونه نیست (یعنی رقیق‌سازی حتی برای نمونه‌های خیلی غلیظ مورد نیاز نیست) زیرا گستره وسیعی از غلظت (کسر حجمی ۰٫۰۱٪ تا ۹۵٪) را پوشش می‌دهد. این روش می‌تواند گستره وسیعی از اندازه ذرات (۱۰ nm تا ۱۰۰۰ μm) را اندازه‌گیری کرده و به حالت پراکنه حساس است. روش پراکنندگی ایستای نور آنالیز وابسته به زمان حالت پراکنه را در نمونه بسیار مشابهی ارائه می‌دهد: و از این رو، به سازوکارهای بی‌ثبات‌کننده (به‌عنوان مثال رسوب‌دهی) زمانی که با فناوری روبش همراه شود، حساس است.

محدودیت‌های این روش آن است که روش فقط میانگین اندازه ذرات را به جای توزیع اندازه می‌دهد. کسر حجمی و ضرایب شکست برای محاسبه میانگین اندازه ذرات مورد نیاز است و قابلیت جذب ممکن است برخی از اندازه‌گیری‌ها را محدود کند.

### ۱۵-۳-۴ استانداردهای مرتبط

ISO/TR 13097, Guidelines for the characterization of dispersion stability

1- Memory of the incident direction

2- Multi-scattered light

## ۱۵-۳-۵ حلالیت و سرعت انحلال

حلالیت به بیشینه جرم نانوشیء اطلاق می‌شود که می‌تواند در یک حلال حل شده تا یک فاز منفرد، همگن و از لحاظ زمانی پایدار به دست آید. حلالیت زمانی اتفاق می‌افتد که ماده در سطح مولکولی با حلال احاطه شده باشد.

این امر اهمیت دارد که حلالیت و پراکنش‌پذیری اشتباه گرفته نشوند. در مورد اول، ذرات مشخصه ذره‌ای خود را از دست می‌دهند و شکل خود را تغییر داده تا به مولکول‌ها و یون‌های کوچکتر تبدیل شوند. پراکنش‌پذیری شامل توزیع ذرات در یک مایع برای تشکیل یک تعلیق است. تاکید بر این تفاوت مهم است، زیرا تشخیص این تمایز در مورد نانوشیاء دشوار می‌باشد.

ممکن است با اصطلاحات امتزاج‌پذیر و غیرقابل امتزاج در هنگام در نظر گرفتن حلالیت یک مایع در مایع دیگر، بطوریکه امتزاج‌پذیر به معنای محلول بودن بدون محدودیت است، مواجه شویم. هنگامی که یافته‌هایی در مورد حلالیت نانومواد در محیط‌های زیست‌شناختی موجود باشد، این یافته‌ها باید در درجه اول برای ارزیابی پایداری زیستی<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار گیرند. حلالیت در آب ممکن است به‌عنوان معیاری برای پایداری زیست‌شناختی به کار رود. چنانچه حلالیت در آب مطلوب باشد، معمولاً ممکن است حلالیت مطلوبی در محیط‌های زیست‌شناختی فرض شود. با این حال، این نکته در تمام موارد صادق نمی‌باشد. در موارد مجزا، حلالیت ضعیف در آب ممکن است با حلالیت مطلوب در محیط‌های زیست‌شناختی همراه باشد. به‌عنوان مثال، کبالت فلزی در آب محلول نیست، اما در سرم حلالیت خوبی نشان می‌دهد. در سطح بین‌المللی، هیچ تعریف واحدی از محدوده غلظت برای توصیف حلالیت در آب وجود ندارد. تعدادی از نانوشیاء به‌طور عمدی به‌گونه‌ای ساخته می‌شوند تا پوشش خاصی داشته باشند که بر حلالیت آنها تأثیر می‌گذارد. در چنین مواردی، استفاده از داده‌های حلالیت هسته برای تخمین پایداری زیستی کل نانوذره مناسب نیست. نانوشیاء پوشش داده شده ممکن است کمتر و یا بیشتر از معادل‌های بدون پوشش آنها حل شوند.

اندازه‌ده برای حلالیت، بیشینه جرم یا غلظت حل‌شونده، در این مورد نانوشیایی است، که می‌توانند در واحد جرم یا حجم حلال در دما و فشار معین (یا استاندارد) حل شوند، یکاها:  $[kg/kg]$  یا  $[kg/m^3]$ ، یا  $g/l$  یا  $[mole/mole]$ .

عوامل زیادی بر حلالیت تأثیر می‌گذارند، از جمله:

- الف- فشار، فشار روی سطح محلول تأثیر بسیار کمی بر حلالیت جامدات و مایعات دارد.
- ب- دما، حلالیت جامدات و مایعات معمولاً با افزایش دما افزایش می‌یابد.
- پ- نیروهای بین ذرات، یکی از عواملی که بر حلالیت تأثیر می‌گذارد، ماهیت نیروهای بین‌مولکولی یا نیروهای بین‌یونی در هر دو ماده حل‌شونده و حلال است. هنگامی که یک ماده در ماده دیگر حل می‌شود، باید بر نیروهای جاذبه هر دو غلبه شود. حل‌شونده باید بتواند انبوهه مولکول‌ها در حلال را

1- Biopersistence

شکسته و مولکول‌های حلال باید جاذبه کافی برای ذرات حل‌شونده داشته باشند تا آنها را یکی‌یکی از همسایگان خود در حل‌شونده حل‌نشده جدا کنند. اگر حل‌شونده یونی باشد، تنها یک حلال بسیار قطبی مانند آب، برهم‌کنش کافی را برای تأثیر بر انحلال فراهم می‌کند. در این ترکیبات نامحلول یونی، برهم‌کنش بین یون‌ها بیشتر از آن است که بتوان با برهم‌کنش با مولکول‌های قطبی آب بر آن غلبه کرد. اگر ذرات حل‌شونده مولکول‌های قطبی باشند، حلال‌های قطبی مانند الکل‌ها معمولاً می‌توانند بر انحلال تأثیر بگذارند. اگر حل‌شونده غیرقطبی باشد، فقط در حلال‌های غیرقطبی حل می‌شود، نه به این دلیل که مولکول‌های قطبی حلال قادر به غلبه بر نیروهای پراکنش ضعیف بین مولکول‌های حل‌شونده نیستند، بلکه به این دلیل که این نیروهای پراکنش برای غلبه بر برهم‌کنش دوقطبی-دوقطبی بین مولکول‌های حلال بسیار ضعیف هستند. به همین دلیل، مقدار حلالیت باید برای هر ترکیب حلال-حل‌شونده اندازه‌گیری شود و می‌تواند به عنوان تابعی از دما، غلظت‌های ناخالصی و سایر پارامترهای خارجی مشخصه‌یابی شود.

سرعت انحلال عموماً به مساحت سطح، دما و مقدار حل‌شونده موضعی در دسترس بستگی دارد. تخمینی از این سرعت را می‌توان با مطالعه سرعت تغییر اندازه نانوشیء به‌عنوان تابعی از زمان به‌دست آورد. اگرچه، به تمایز بین رسوب‌دهی و انحلال باید دقت شود. انحلال نانوذرات فلزی و اکسید فلزی اغلب با ICP-MS یا ICP-OES اندازه‌گیری می‌شود.

#### ۱۵-۳-۶ استانداردهای مرتبط

ISO 7579, Dyestuffs - Determination of solubility in organic solvents - Gravimetric and photometric methods

ISO/TR 13014, Nanotechnologies - Guidance on physico-chemical characterization of engineered nanoscale materials for toxicologic assessment

#### ۱۵-۴ خواص مکانیکی

##### ۱۵-۴-۱ کلیات

افزودن نانوآشپاء به مواد زمینه مانند پلاستیک، لاستیک یا ساخت مواد جامد از نانوآشپاء مانند سرامیک، خواص مکانیکی مواد زمینه و همچنین سایر پارامترها را تغییر می‌دهد. پارامترهای کلیدی مکانیکی چنین چندسازه‌ای را می‌توان به‌عنوان اندازه‌دهه‌های توده‌ای طبقه‌بندی کرد که در آن هیچ تفکیک‌پذیری فضایی وجود ندارد یا پارامترهای تفکیک‌شده فضایی با پروب‌های با تفکیک‌پذیری بالا در مقیاس نانو اندازه‌گیری می‌شوند. برخی از روش‌ها امکان اندازه‌گیری خواص با تفکیک فضایی را فراهم می‌کنند (مانند AFM)، در حالی که برخی دیگر فقط خواص کل ماده را اندازه‌گیری می‌کنند. نتایج سختی موضعی یا هدایت الکتریکی ممکن است به‌طور قابل‌توجهی با اندازه‌گیری‌های مقیاس بزرگتر متفاوت باشند. این خواص مکانیکی باید با همان روش‌های آزمونی اندازه‌گیری شوند که طی سال‌های متمادی برای مواد معمول توسعه یافته‌اند. خلاصه‌ای از اندازه‌دهه‌ها در جدول ۱۹ ارائه شده‌است.

یادآوری - خلاصه مطلوبی از روش‌های آزمون در مرجع [90] ارائه شده‌است.

جدول ۱۹- اندازه‌ده‌های مربوط به خواص مکانیکی مواد نانوچندسازه جامد

اندازه‌ده نهایی	اندازه‌ده ویژه هر روش	روش	محدوده	تفکیک پذیری	محدودیت‌ها	مراجع
خواص کشسانی در مقیاس بزرگ	مدول یانگ، نسبت پواسون، مدول برشی	مبدل تفاضلی متغیر خطی یا کرنش‌سنج	۱۰۰ nm تا ۵۰۰mm	اندازه‌گیری توده‌ای	دماهای زم‌زایشی یا تا دمای ۶۵۰°C درستی ۵٪ تا ۷٪	[91]
خواص کشسانی در مقیاس بزرگ	بسامد تشدید	روش فراصوت تپی، روش ارتعاش آزاد، تشدید آزاد با تحریک ضربه ای، تشدید آزاد با تحریک مداوم	فقط نوسانات کوچک	اندازه‌گیری توده‌ای	تنها برای اندازه‌گیری‌های کرنش کم قابل استفاده است. درستی ۰٫۱٪ تا ۱٪	[92], [93]
خواص تغییر شکل کشسان و پلاستیکی موضعی	مدول یانگ (Pa)، سختی (Pa). بطور بالقوه پارامترهای استحکام تسلیم، حداکثر کرنش پلاستیک، شکل پذیری (چکش خواری) و خزش را می‌دهد.	فروروندگی ابزاری <sup>۱</sup> یا AFM	کاوش در مقیاس طول نانومتر تا میکرومتر	تفکیک‌پذیری آزمون موضعی می‌تواند در مقیاس نانو باشد.	تفکیک‌پذیری بار نوعی: <math>1\text{ nN}</math> و تفکیک پذیری جابجایی: <math>0.0004\text{ nN}</math>	ISO 14577-1, ISO 14577-2, ISO 14577-3, ISO 14577-4
خواص مکانیکی	استحکام تسلیم (Pa)، مدول یانگ، UTS <sup>۲</sup>	آزمون کشش	بسته به روش مورد استفاده	عدم قطعیت نوعی بین ۱٪ تا ۵٪ است.		ISO 6892-1
عملکرد تریبولوژی	سرعت سایش (m <sup>3</sup> /Nm)، ضریب اصطکاک، مقاومت در برابر سایش، مقاومت در برابر فرسایش	تریبومتری <sup>۳</sup>	معمولاً ۱ mm تا ۱۰۰۰mm	روش آزمون در مقیاس بزرگ	تفکیک‌پذیری فضایی ضعیف	

1- Instrumented indentation  
2 - Ultimate tensile strength  
3 - Tribometry



#### ۱۵-۴-۲ اندازه‌گیری ثابت‌های کشسانی با روش‌های ایستا

آزمایش‌های بارگذاری ایستا تعدادی پارامتر مربوط به خواص تغییر شکل کشسان و پلاستیکی جامدات را به دست می‌دهند. پارامترهای کلیدی شامل مدول یانگ، نسبت پواسون و مدول برشی هستند.

برای نمونه‌های در اندازه ماکرو ساخته‌شده از سرامیک یا مواد دیگر مانند بتن، مدول یانگ را می‌توان با روش‌های خمشی ۳ نقطه‌ای و ۴ نقطه‌ای اندازه‌گیری کرد. برای الیاف ساخته شده از فلزات، سرامیک یا شیشه، مدول یانگ را می‌توان از اندازه‌گیری‌های افزایش طول و سطح مقطع به‌دست آورد. ورق‌های پلاستیکی یا بسیاری در حالت کشش آزموده می‌شوند. درستی اندازه‌گیری ممکن است فقط ۵٪ تا ۷٪ باشد. برخی از مزایای این روش عبارتند از امکان آزمون گستره وسیعی از طول اندازه‌گیری‌ها از ۱۰ mm تا ۲۵۰۰ mm و در گستره وسیع دما از حدود ۷۵ °C تا ۱۲۰۰ °C.

#### ۱۵-۴-۳ استانداردهای مرتبط

ASTM C1341-13, Standard Test Method for Flexural Properties of Continuous Fibre-Reinforced Advanced Ceramic Composites [96]

ASTM D882-12, Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting [97]

ASTM E111-04, Standard test method for Young's modulus, tangent modulus, and chord modulus [91]

ASTM E132-04, Standard test method for Poisson's ratio at room temperature [94]

ASTM E143-13, Standard test method for shear modulus at room temperature [95]

#### ۱۵-۴-۴ اندازه‌گیری ثابت‌های کشسانی با روش‌های پویا

روش‌های پویا برای اندازه‌گیری خواص کشسانی مانند مدول یانگ، مدول برشی و نسبت پواسون برای تعدادی از مواد جامد، درستی بالایی ارائه می‌دهند و از اثراتی مانند خزش یا پسماند کشسان جلوگیری می‌کنند. روش‌های پویا برای تعیین ثابت‌های کشسانی شامل روش فراصوت تپی، روش ارتعاش آزاد، تشدید آزاد با تحریک ضربه‌ای و تشدید آزاد با تحریک مداوم است.

در عمل دو نوع آزمون تست پویا وجود دارد. یکی از روش‌ها از اندازه‌گیری زمان پرواز یک تپ فراصوت استفاده می‌کند و سرعت فراصوت را در مواد با ابعاد و چگالی شناخته‌شده به‌دست می‌دهد که به مدول یانگ با درستی ۰٫۱ درصد منجر می‌شود. روش دیگر میله (آزمونه) که بطور آزادانه ارتعاش می‌کند را برای یافتن بسامد تشدید، به طور مکانیکی تحریک می‌کند. ابعاد آزمونه برای محاسبه پارامترهای کشسانی استفاده می‌شود. مزایای این روش آنست که از اثرات پیچیده کرنش بزرگ مانند خزش یا پسماند کشسان اجتناب می‌شود. بسامدهای آزمایشی از ۵۰۰ Hz تا ۳۰ kHz استفاده می‌شود.

#### ۱۵-۴-۵ استانداردهای مرتبط

ASTM E1875-13, Standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by sonic resonance [92]

ASTM E1876-09, Standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration [93]

#### ۱۵-۴-۶ اندازه‌گیری خواص کشسانی و پلاستیک با روش‌های فروروندگی ایزاری

بیشتر اندازه‌گیری‌های کشسانی به خواص ماکرومقیاس مانند مدول یانگ یا نسبت پواسون و سختی سطح اشاره دارد، اگرچه در برخی موارد اندازه‌گیری ماکرومقیاس به سادگی ممکن نیست یا در حالتی که اندازه‌گیری اجزای خاصی از یک سامانه مواد از قبیل فازهای مجزا در چندسازه‌ها یا پوشش‌ها مورد نیاز است، مناسب نیست.

در این حالت، یک فروروندگی در سطح نمونه ایجاد می‌شود. یک نیروی معین (با عناصر پیزوالکتریک، بصورت الکتروایستایی یا الکترومغناطیسی) اعمال می‌شود و جابجایی به‌وسیله انواع سنج‌ها (حسگرهای خازنی، مبدل‌های تفاضلی متغیر خطی یا تداخل‌سنج‌های لیزری) اندازه‌گیری می‌شود. فرورونده‌ها می‌توانند به شکل هرم‌های ۴ یا ۳ وجهی (یا هندسه گوشه مکعبی) و همچنین کروی باشند. ساخت مورد دومی دشوار است اما داده‌های تغییر شکل کشسانی مطلوبی به‌دست می‌دهد. تغییر شکل اغلب ترکیبی از تغییر شکل پلاستیک و کشسان در نمونه است. منحنی بار در مقابل جابجایی را می‌توان برای به‌دست آوردن سختی از عمق دائمی فرورفتگی، و مدول یانگ از شیب منحنی باربرداری<sup>۱</sup> تحلیل کرد، اما این تحلیل متکی بر یک سامانه آزمون خوب کالیبره‌شده از جمله کالیبراسیون شکل سوزن و ورودی مقدار نسبت پواسون (برآورد شده یا اندازه‌گیری شده با روش‌های دیگر) است، اما نتیجه‌ای برای مدول یانگ با خطای ۵٪ قابل دستیابی است. سایر پارامترها، پارامترهای تغییر شکل پلاستیک مانند استحکام تسلیم، بیشینه کرنش پلاستیک و شکل‌پذیری و خواص گرانونکشسانی برای مواد گرانونکشسان را می‌توان با این روش ارزشیابی کرد. این آزمون‌ها اندازه‌گیری موضعی پارامترهای مواد کشسان و پلاستیک را در محل ارائه می‌دهند.

#### ۱۵-۴-۷ استانداردهای مرتبط

ISO 14577-1, Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters — Part 1: Test method

ISO 14577-2, Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters — Part 2: Verification and calibration of testing machines

ISO 14577-3, Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters — Part 3: Calibration of reference blocks

ISO 14577-4, Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters — Part 4: Test method for metallic and non-metallic coatings

---

1- Unloading curve

#### ۸-۴-۱۵ اندازه‌گیری خواص سطح و سایش

سایش مکانیکی ممکن است با تعدادی از روش‌های میکرو و ماکرومقیاس یا نانومقیاس با استفاده از AFM اندازه‌گیری شود. روش آزمون مناسب به سازوکار سایش که در حال مطالعه است، بستگی دارد. سایش از طریق برهم‌کنش دو سطح با انواع مختلف سایش از جمله تماس لغزشی<sup>۱</sup>، غلتشی<sup>۲</sup>، فرسایش<sup>۳</sup> و سایش<sup>۴</sup> رخ می‌دهد. روش‌های مختلف آزمون برای این انواع مختلف تماس مکانیکی موجود است. اکثر آزمون‌های سایش مکانیکی به‌طور خاص به مقیاس نانو مربوط نمی‌شوند، اما بزرگی سایش و اصطکاک ایجادشده تقریباً همیشه به‌وسیله پدیده‌های در مقیاس میکرو و نانو که در فصل مشترک تماس رخ می‌دهند، کنترل می‌شوند. اندازه ده‌های کلیدی، ضریب اصطکاک و نرخ سایش<sup>۵</sup> هستند که با بار عمودی و فاصله لغزش و همچنین خواص مواد مرتبط هستند.

#### ۵-۱۵ استانداردهای مرتبط

ISO/TR 11811, Nanotechnologies - Guidance on methods for nano- and microtribology measurements

- 
- 1- Sliding
  - 2- Rolling contact
  - 3- Erosion
  - 4- Abrasion
  - 5- Wear rate

کتابنامه

- [1] KESKINEN J., PIETARINEN K., LEHTIMÄKI M. Electrical-low pressure impactor. *J. Aerosol Sci.* 1992, **23** pp. 353–360
- [2] WANG S.C., FLAGAN R.C. Scanning electrical mobility spectrometer. *Aerosol Sci. Technol.* 1990, **13** pp. 230–240
- [3] KOO J.H. HIRLEMAN E.D. Review of principles of optical techniques for particle size measurements. In: *Recent advances in spray combustion: spray atomization and drop burning phenomena*, (Kuo K.K., ed.). American Institute of Aeronautics, Reston, VA, **Vol. 1**, 1996, pp. 3–32.
- [4] WILSON J.C., LIU B.H.Y. Aerodynamic particle size measurement by Laser-Doppler velocimetry. *J. Aerosol Sci.* 1980, **11** pp. 139–150
- [5] R'MILI B., LE BIHAN O., DUTOUQUET C., AGUERRE-CHARIOL O., FREJAFON E., Particle Sampling by TEM Grid Filtration. *Aerosol Sci. Technol.* 2013, **47** (7) pp. 767–775
- [6] LE BIHAN O., ZANTMAN A., THEVENET S. R'Mili, B.; Ustache, A. Evaluation de l'efficacité de prélèvement d'un précipitateur électrostatique. 26eme Congrès Français sur les Aérosols (CFA 2011), Paris, France, 2011, pp.NC. HAL Id: ineris-00973609 [http:// hal -ineris .ccsd .cnrs .fr/ ineris -00973609](http://hal-ineris.ccsd.cnrs.fr/ineris-00973609)
- [7] PACHAURI T., SINGLA V., SATSANGI A., LAKHANI A., MAHARAJ KUMARI K. SEM-EDX Characterization of Individual Coarse Particles in Agra, India. *Aerosol Air Qual. Res.* 2013, **13** pp. 523–536
- [8] HODOROABA V.-D., RADES S., KISHORE N., ORTS-GIL G., UNGER W.E.S. Morphology of Nanoparticles: A Characterization Using High-Resolution SEM. *Imaging & Microscopy.* 2013, **15** p. 54
- [9] BRUNAUER S., EMMETT P.H., TELLER E. Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. Am. Chem. Soc.* 1938, **60** pp. 309–319
- [10] MCCAVE I.N., BRYANT R.J., COOK H.F., COUGHANOWR C.A. Evaluation of a Laser-Diffraction-Size Analyzer For Use with Natural Sediments. *J. Sediment. Res.* 1986, **56** (4) pp. 561–564
- [11] INGHAM B X-ray scattering characterisation of nanoparticles, *Crystallography Reviews*, 2015 **21**(4), pp. 229-303

- [12] DRESSELHAUS M.S., JORIO A., HOFMANN M., DRESSELHAUS G., SAITO R. Perspectives on Carbon Nanotubes and Graphene Raman Spectroscopy. *Nano Lett.* 2010, **10** (3) pp. 751–758
- [13] BOKOVA S.N., OBRAZTSOVA E.D., GREBENYUKOV V.V., ELUMEEVA K.V., ISHCENKO A.V., KUZNETSOV V.L. Raman diagnostics of multi-wall carbon nanotubes with a small wall number. *Phys. Status Solidi.* 2010, **247** (11-12) pp. 2827–2830 [b]
- [14] BRAUN A., COUTEAU O., FRANKS K., KESTENS V., ROEBBEN G., LAMBERTY A. et al. , Validation of dynamic light scattering and centrifugal liquid sedimentation methods for nanoparticle characterization. *Adv. Powder Technol.* 2011, **22** (6) pp. 766–770
- [15] GUINIER A., FOURNET G. *Small-Angle Scattering of X-rays.* Wiley, New York, 1955
- [16] QIAN H., SHEETZ M.P., ELSON E.L. Single particle tracking. Analysis of diffusion and flow in two dimensional systems. *Biophys. J.* 1991, **60** (4) pp. 910–921
- [17] SCHIMPF, ME; CALDWELL, K; GIDDINGS, JC, *Field flow fractionation handbook.* Wiley-Interscience: New York, 2000.
- [18] GIGAULT, J; PETTIBONE, JM; SCHMITT, C; HACKLEY, VA, Rational strategy for characterization of nanoscale particles by asymmetric-flow field flow fractionation: A tutorial. *Anal Chim Acta* 2014, **809**, 9-24
- [19] DEGUELDRE C. AND FAVARGER P.Y., Colloid analysis by single particle inductively coupled plasma mass spectroscopy: a feasibility study. *Colloids Surf., A*, 2003, **217**, 137–142
- [20] ASTM E2490-09, Standard guide for measurement of particle size distribution of nanomaterials in suspension by Photon Correlation Spectroscopy (PCS)
- [21] ASTM E3247-20, Standard Test Method for Measuring the Size of Nanoparticles in Aqueous Media Using Dynamic Light Scattering
- [22] KESTENS V., BOZATZIDIS V, DE TEMMERMAN P-J, RAMAYE Y, ROEBBEN G, *J. Nanopart. Res.*, 2017, **19**:271
- [23] ASTM E2834-12, Standard Guide for Measurement of Particle Size Distribution of Nanomaterials in Suspension by Nanoparticle Tracking Analysis (NTA)

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۲۰۴۵۴: سال ۱۳۹۵، موضوع: اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات نانومواد در سوسپانسیون به روش آنالیز ردیابی مسیر حرکت نانو ذره (NTA) با استفاده از استاندارد ASTM E 2834: 2012 تدوین شده است.

- [24] GROBELNY J. W., Pradeep, N.; Kim D. I.; Hackley V. A.; Cook R. F. Size measurement of nanoparticles using atomic force microscopy. *Methods Mol. Biol.* 2011, **697** pp. 71–82. Available at: Del Rio, F.
- [۲۵] استاندارد ملی ایران شماره ۱۵۶۰۳: سال ۱۳۹۷، فناوری نانو- تعیین اندازه نانوذرات با استفاده از روش میکروسکوپی نیروی اتمی- راهنما
- [26] BRIGGS D., SEAH M.P. *Practical Surface Analysis by Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy*. John Wiley & Sons, Chichester, 1983
- [27] RADES S., WIRTH T., UNGER W., Investigation of silica nanoparticles by Auger electron spectroscopy (AES), *Surf. Interface Anal.* 2014, **46**, 952–956
- [28] BAER DR, GASPAR DJ, NACHIMUTHUA P., TECHANE SD, CASTNER DG Application of Surface Chemical Analysis Tools for Characterization of Nanoparticles. *Anal. Bioanal. Chem.* 2010 February, **396** (3) pp. 983–1000.
- [29] HODOROABA V-D, UNGER W, SHARD A (Eds), *Characterization of Nanoparticles, Measurement Processes for Nanoparticles*, Elsevier, 2019
- [30] EGERTON R.F. *Electron Energy-Loss Spectroscopy in the Electron Microscope*. Springer New York, Third Edition, 2011 – lots of references elsewhere
- [31] IAKOUBOVSKII K., MITSUISHI K., NAKAYAMA Y., FURUYA K. Thickness measurements with electron energy loss spectroscopy. *Microsc. Res. Tech.* 2008, **71** (8) pp. 626–631. DOI: 10.1002/jemt.20597
- [32] BENNINGHOVEN F.G., Rüdener, H. W. Werner “Secondary Ion Mass Spectrometry: Basic Concepts, Instrumental Aspects, Applications, and Trends”. Wiley, New York, 1987, 1227 p.
- [33] SENONERA M, UNGER WES, SIMS imaging of the nanoworld: applications in science and technology, (Critical Review) *J. Anal. At. Spectrom.*, 2012, **27**, 1050-1068
- [34] LACHANCE G.R., CLAISSE F. *Quantitative X-ray fluorescence analysis*. Wiley-Interscience, New York, 1994
- [35] BECKHOFF B., KANNGIEßER N., LANGHOFF, WEDELL R, WOLFF H, *Handbook of practical X-ray fluorescence analysis*. Springer, 2006
- [36] SCHOONJANS T.SILVERSMIT G., VEKEMANS B., SCHMITZ S., BURGHAMMER M., RIEKEL C. et al. , Fundamental parameter based quantification algorithm for confocal nano-X-ray fluorescence analysis. *Spectrochim. Acta B At. Spectrosc.* 2012, **67** pp. 32–42

- [37] A. BUNACIU A., UDRIȘTIOIUB E.G. ABOUL-ENEIN H.Y., X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications. *Crit. Rev. Anal. Chem.* 2015, **45** (4) pp. 289–299
- [38] KJÆRVIK M. et al, 2017 *J. Phys.: Condens. Matter* **29** 47400 DOI 10.1088/1361-648X/aa8b9d
- [39] HODOROABA V-D RADES S, SALGE T, MIELKE J, ORTEL E, SCHMIDT R, Characterisation of nanoparticles by means of high-resolution SEM/EDS in transmission mode, 2016 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 109 012006
- [40] BELSEY NACANT DJH, MINELLI C, ARAUJO JR, BOCK B, SHARD AG et al, Versailles Project on Advanced Materials and Standards Interlaboratory Study on Measuring the Thickness and Chemistry of Nanoparticle Coatings Using XPS and LEIS, *J Phys Chem C Nanomater Interfaces*. 2016 Oct 27; **120**(42): 24070–24079.
- [41] FONDEUR F, MITCHELL B S. A modified diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy cell for depth profiling of ceramic fibers *Spectrochimica Acta Part A* 56 (2000) pages 467–473
- [42] SAPTARI V., *Fourier-Transform Spectroscopy Instrumentation Engineering*. SPIE Publication, Bellingham, 2003
- [43] SHERMAN HSU C.-P., *Handbook of Instrumental Techniques for Analytical Chemistry Infrared Spectroscopy. Chapter 15*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, 2000
- [44] MALKA I J. BYSTRZYCKI. The effect of storage time on thermal behavior of nanocrystalline magnesium hydride with metal halide additives, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2014 (39:7) pages 3352- 3359;
- [45] DOUGLAS A. SKOOG, F., HOLLER J., STANLEY R. CROUCH; *Principles of Instrumental Analysis*. Thomson Brooks/Cole, Belmont, CA, Sixth Edition, 2007
- [46] [http:// www .raman .de/](http://www.raman.de/)
- [47] LABORDA F., JIMENEZ-LAMANA J., BOLEA E., AND CASTILLO J., Selective identification, characterization and determination of dissolved silver(I) and silver nanoparticles based on single particle detection by inductively coupled plasma mass spectrometry, *J. Anal. At. Spectrom.*, 2011, **26**, 1362-1371.
- [48] LIU, J. Y., MURPHY, K. E., MACCUSPIE, R. I., AND WINCHESTER, M. R., “Capabilities of Single Particle Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry for the Size Measurement of Nanoparticles: A Case Study on Gold Nanoparticles,” *Analytical Chemistry*, **86**, 3405-3414 (2014).

- [49] PETERS, R.J.B., VAN BEMMEL, G., HERRERA-RIVERA, Z., HELSPER, H.P.F.G., MARVIN, H.J.P., WEIGEL, S., TROMP, P.C., OOMEN, A.G., RIETVELD, A.G., BOUWMEESTER, H. Characterization of titanium dioxide nanoparticles in food products: Analytical methods to define nanoparticles. *J. Agric. Food Chem.*, 2014, **62**, 6285–6293
- [50] OLESIK W., Elemental analysis using ICP-OES and ICP-MS, *Anal. Chem.*, 1991, **63**, 12A-21A.
- [51] EHARA K., HAGWOOD C., COAKLEY K.J. Novel method to classify aerosol particles according to their mass-to-charge ratio—Aerosol particle mass analyser. *J. Aerosol Sci.* 1996 March, **27** (2) pp. 217–234
- [52] NOBLE C.A., PRATHER K.A. Real-time single particle mass spectrometry: A historical review of a quarter century of the chemical analysis of aerosols. *Mass Spectrom. Rev.* 2000, **14** pp. 248–274
- [53] TAMARI S., Optimum design of the constant-volume gas pycnometer for determining the volume of solid particles. *Meas. Sci. Technol.* 2004, **5** pp. 549–558
- [54] LOWELL S, SHIELDS J E, THOMAS M A, THOMMES M, *Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Pore Size and Density*, Springer, 2004
- [55] WYATT P.J., Light scattering and the absolute characterization of macromolecules. *Anal. Chim. Acta.* 1993, **272** pp. 1–40
- [56] BURG T P, GODIN M, KNUDSEN S M, SHEN W, CARLSON G, FOSTER J S, BABCOCK K, MANALIS S R, Weighing of biomolecules, single cells and single nanoparticles in fluid, *Nature* . 2007 Apr 26; **446**(7139):1066-9.
- [57] XU R., Progress in nanoparticles characterization: Sizing and zeta potential measurement. *Particuology*. 2008 April, **6** (2) pp. 112–115
- [58] LOWRY G.V., HILL R.J., HARPER S., RAWLE A.F., HENDREN C.O., KLAESSIG F., NOBBMANN U., SAYREH P., RUMBLE J. Guidance to improve the scientific value of zeta-potential measurements in nanoEHS. *Environ. Sci.: Nano.* 2016, **3** pp. 953-965
- [59] O'BRIEN R.W., CANNON D.W., ROWLANDS W.N. Electroacoustic determination of particle size and zeta potential. *J. Colloid Interface Sci.* 1995 August, **173** (2) pp. 406–418
- [60] CRAIEVICH A.F. Synchrotron SAXS Studies of Nanostructured Materials and Colloidal Solutions, A Review. *Mater. Res.* 2002, **5** (1) pp. 1–11



- [61] GRAEWERT M.A., SVERGUN D.I. Impact and progress in small and wide angle X-ray scattering (SAXS and WAXS). *Curr. Opin. Struct. Biol.* 2013, **23** (5) pp. 748–754
- [62] ZHANG F., ILAVSKY J. Ultra-small-angle X-ray scattering of polymers. *J. Macromol. Sci. Part C Polym. Rev.* 2010, **50** (1) pp. 59–90
- [63] CLEGG, W. (1998). *Crystal structure determination*. Oxford Chemistry Primers, 60(1)
- [64] KISIELOWSKI C.FREITAG B., BISCHOFF M., VAN LIN H., LAZAR S., KNIPPELS G. et al. , Detection of single atoms and buried defects in three dimensions by aberration-corrected electron microscope with 0.5-Å information limit. *Microsc. Microanal.* 2008, **14** (05) pp. 469–477
- [65] BABA-KISHI K.Z., Review Electron backscatter Kikuchi diffraction in the scanning electron microscope for crystallographic analysis. *J. Mater. Sci.* 2002, **37** (9) pp. 1715–1746
- [66] SUBRAMANIAN A., MARKS L.D. Surface crystallography via electron microscopy. *Ultramicroscopy.* 2004, **98** (2) pp. 151–157
- [67] BLAKELEY M.P., LANGAN P., NIIMURA N., PODJARNY A. Neutron crystallography: opportunities, challenges, and limitations. *Curr. Opin. Struct. Biol.* 2008, **18** (5) pp. 593–600
- [68] WILLIAMS H.W., CHAMBERLAND B.L. Determination of Curie, Neel, or crystallographic transition temperatures via differential scanning calorimetry. *Anal. Chem.* 1969, **41** (14) pp. 2084–2086
- [69] FLAMMERSHEIM H.-J. *Differential Scanning Calorimetry, An Introduction for Practitioners*. Springer- Verlag, Berlin, 1996
- [70] HARRIS R.K., NMR crystallography: the use of chemical shifts. *Solid State Sci.* 2004, **6** (10) pp. 1025–1037
- [71] TAULELLE F., NMR crystallography: crystallochemical formula and space group selection. *Solid State Sci.* 2004 October, **6** (10) pp. 1053–1057
- [72] CAREY P.R., Raman crystallography and other biochemical applications of Raman microscopy. *Annu. Rev. Phys. Chem.* 2006, **57** pp. 527–554
- [73] TISSUE, B. M. (2002). *Ultraviolet and Visible Absorption Spectroscopy. Characterization of Materials*
- [74] GILLILAND G.D., Photoluminescence spectroscopy of crystalline semiconductors. *Mater. Sci. Eng. Rep.* 1997, **18** (3) pp. 99–399

- [75] LAKOWICZ J.R., ed. Principles of fluorescence spectroscopy. Springer Science & Business Media, 2013
- [76] DEEN M.J., PASCAL F. Electrical characterization of semiconductor materials and devices - review. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 2006, **17** (8) pp. 549–575
- [77] STALLINGA P., *Electrical Characterization of Organic Electronic Materials and Devices.* John Wiley & Sons, 2009
- [78] KANO S, TADA T, MAJIMA Y, Nanoparticle characterization based on STM and STS, *Chemical Society Reviews*, **44** 970-987, 2015
- [79] LANZA M (Editor), *Conductive Atomic Force Microscopy: Applications in Nanomaterials*, Wiley, 2017.
- [80] PROKSCH R., KALININ S. Piezoresponse Force Microscopy. *Micros. Today.* 2009, **17** (06) pp. 10–15
- [81] NASIRPOURI F., NOGARET A. *Nanomagnetism and spintronics: fabrication, materials, characterization and applications.* World Scientific, 2011
- [82] MILLS D.L.L., BLAND J.A.C. *Nanomagnetism: ultrathin films, multilayers and nanostructures.* Elsevier, **Vol. 1**, 2006
- [83] FONER S. Review of magnetometry. *Magnetics. IEEE Transactions on.* 1981, **17** (6) pp. 3358–3363
- [84] KLEEMANN, W. *Magneto-optical Materials. Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials*
- [85] FOCK J, BOGART L K, GONZÁLEZ-ALONSO D, ESPESO J I, MIKKEL HANSEN F, VARÓN M, FRANDBSEN C, PANKHURST Q. A., On the 'centre of gravity' method for measuring the composition of magnetite/maghemite mixtures, or the stoichiometry of magnetite-maghemite solid solutions, via  $^{57}\text{Fe}$  Mössbauer spectroscopy, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **50**, 265005
- [86] BOGART L K., BLANCO-ANDUJAR C, PANKHURST Q.A., Environmental oxidative aging of iron oxide nanoparticles featured, *Appl. Phys. Lett.* **113**, 133701 (2018);
- [87] RUGAR D.MAMIN H.J., GUETHNER P., LAMBERT S.E., STERN J.E., MCFADYEN I. et al. , Magnetic force microscopy: General principles and application to longitudinal recording media. *J. Appl. Phys.* 1990, **68** (3) pp. 1169–1183
- [88] ASTM A342/A342M-14, Standard Test Methods for Permeability of Weakly Magnetic Materials

- [89] GOMÈS S ASSY A, CHAPUIS P-O, Scanning thermal microscopy: A review, *physica status solidi (a)*, 212, 477-494, 2015
- [90] CZICHOS S. SMITH S., eds. *Handbook of Metrology and Testing*. 2011
- [91] ASTM E111 -04: 2010, Standard test method for Young's modulus, tangent modulus, and chord modulus
- [92] ASTM E1875-13, Standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by sonic resonance
- [93] ASTM E1876-09, Standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration
- [94] ASTM E132 -04: 2010, Standard test method for Poisson's ratio at room temperature
- [95] ASTM E143-13, Standard test method for shear modulus at room temperature
- [96] ASTM C1341-13, Standard Test Method for Flexural Properties of Continuous Fibre-Reinforced Advanced Ceramic Composites
- [97] ASTM D882-12, Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting
- [98] ISO 26824:2013, Particle characterization of particulate systems - Vocabulary
- [99] ISO/IEC Guide 99, International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM)
- [100] ISO 13322-1, Particle size analysis - Image analysis methods - Part 1: Static image analysis methods
- یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۰۰۹۹: سال ۱۳۹۵، آنالیز اندازه ذرات- روش‌های آنالیز تصویری قسمت ۱: روش‌های آنالیز تصویری ایستا با استفاده از استاندارد ISO 13322-1: 2014 تدوین شده‌است.
- [101] ISO 23210, Stationary source emissions - Determination of PM10/PM2,5 mass concentration in flue gas - Measurement at low concentrations by use of impactors
- یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۲۳۲۱۰: سال ۱۳۹۱، انتشارات ذرات از منبع ثابت- تعیین غلظت جرمی ذرات PM10 , PM2.5 خروجی از گاز دودکش اندازه‌گیری در غلظت کم با استفاده از ایمپکتورها با استفاده از استاندارد ISO 23210: 2009 تدوین شده‌است.
- [102] ISO 13138, Air quality - Sampling conventions for airborne particle deposition in the human respiratory system
- یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۲۲۵۸۷: سال ۱۳۹۶، کیفیت هوا- توافق‌های نمونه‌گیری از رسوب ذرات هوایی در سامانه تنفسی انسان با استفاده از استاندارد ISO 13138: 2012 تدوین شده‌است.
- [103] EN 16966:2018, Workplace exposure. Measurement of exposure by inhalation of nano-objects and their aggregates and agglomerates. Metrics to be used such as number concentration, surface area concentration and mass concentration

[104] ISO 21432, Non-destructive testing – Standard test method for determining residual stresses by neutron diffraction

[105] ISO 18115-1, Surface chemical analysis – Vocabulary – Part 1: General terms and terms used in spectroscopy

[106] ISO 11358-1, Plastics – Thermogravimetry (TG) of polymers – Part 1: General principles

یادآوری – استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۰۶۷۶: سال ۱۳۹۳، پلاستیک – وزن سنجی-گرمایی (TG) – پلیمرها- قسمت ۱: اصول کلی با استفاده از استاندارد ISO 11358-1: 2014 تدوین شده است.

[107] ISO 13826, Metallic and other inorganic coatings – Determination of thermal diffusivity of thermally sprayed ceramic coatings by laser flash method

یادآوری – استاندارد ملی ایران شماره ۹-۱۸۴۰۹: سال ۱۳۹۳، پوشش‌های فلزی و سایر پوشش‌های معدنی – تعیین نفوذپذیری گرمایی پوشش‌های سرامیک پاششی گرمایی بوسیله روش تاباندن لیزر با استفاده از استاندارد ISO 13826: 2013 تدوین شده است.

[108] ISO/TS 12901-2, Nanotechnologies – Occupational risk management applied to engineered nanomaterials – Part 2: Use of the control banding approach

یادآوری – استاندارد ملی ایران شماره ۲-۱۹۸۱۶: سال ۱۳۹۷، فناوری نانو – مدیریت ریسک شغلی نانومواد مهندسی شده – قسمت ۲: استفاده از رویکرد دسته‌بندی اقدامات کنترلی با استفاده از استاندارد ISO/TS 12901-2: 2014 تدوین شده است.

[109] ISO/TS 22107, Dispersibility of solid particles into a liquid

[110] ISO 9276-1, Representation of results of particle size analysis – Part 1: Graphical representation

یادآوری – استاندارد ملی ایران شماره ۱-۸۲۰۱: سال ۱۳۸۴، ارائه نتایج دانه‌بندی قسمت اول: نمایش ترسیمی با استفاده از استاندارد ISO 9276-1: 1998 تدوین شده است.

[111] ISO 9276-2, Representation of results of particle size analysis – Part 2: Calculation of average particle sizes/diameters and moments from particle size distributions

[112] ISO 9276-3, Representation of results of particle size analysis – Part 3: Adjustment of an experimental curve to a reference model

یادآوری – استاندارد ملی ایران شماره ۳-۸۲۰۱: سال ۱۳۹۰، نمایش نتایج آنالیز اندازه ذره – قسمت ۳ – تطبیق منحنی تجربی با مدل مرجع با استفاده از استاندارد ISO 9276-3: 2008 تدوین شده است.

[113] ISO 9276-4, Representation of results of particle size analysis – Part 4: Characterization of a classification process

[۱۱۳] استاندارد ملی ایران شماره ۴-۸۲۰۱: سال ۱۳۸۴، ارائه نتایج دانه‌بندی – قسمت ۴: توصیف فرآیند طبقه‌بندی با استفاده از استاندارد ISO 9276-4: 2001 تدوین شده است.

[114] ISO 9276-5, Representation of results of particle size analysis - Part 5: Methods of calculation relating to particle size analyses using logarithmic normal probability distribution

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱۱۶۱۷-۵: سال ۱۳۸۷، نمایش نتایج آنالیز اندازه ذره - قسمت ۵: روش‌های محاسبه مربوط به آنالیزهای اندازه ذره که از توزیع احتمال نرمال لگاریتمی استفاده می‌کنند با استفاده از استاندارد ISO 9276-5: 2005 تدوین شده‌است.

[115] ISO 9276-6, Representation of results of particle size analysis - Part 6: Descriptive and quantitative representation of particle shape and morphology

[116] ISO/TR 27628, Workplace atmospheres - Ultrafine, nanoparticle and nano-structured aerosols - Inhalation exposure characterization and assessment

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۲۲۴۸۳: سال ۱۳۹۶، اتمسفرهای محل کار - ذرات معلق (آئروسول) بسیار ریز، نانوذرات و نانو ساختار - خصوصیات و ارزیابی مواجهه استنشاق با استفاده از استاندارد ISO/TR 27628: 2007 تدوین شده‌است.

[117] ISO/TR 18196, Nanotechnologies - Measurement technique matrix for the characterization of nano-objects

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۲۲۶۱۱: سال ۱۳۹۶، فناوری نانو - ماتریس روش اندازه‌گیری برای مشخصه‌یابی نانو اشیاء با استفاده از استاندارد ISO/TR 18196: 2016 تدوین شده‌است.

[118] ISO 15900, Determination of particle size distribution - Differential electrical mobility analysis for aerosol particles

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱۳۸۳۰: سال ۱۳۸۹، تعیین توزیع اندازه ذره - تحلیل قابلیت حرکت الکتریکی تفاضلی برای ذرات آئروسول با استفاده از استاندارد ISO 15900: 2009 تدوین شده‌است.

[119] EN ISO 28439, Workplace atmospheres - Characterization of ultrafine aerosols/nano aerosols - Determination of the size distribution and number concentration using differential electrical mobility analysing systems

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۲۲۲۹۹: سال ۱۳۹۶، هوای محل کار - ویژگی‌های آئروسول‌های بسیار ریز/نانو آئروسول‌ها - تعیین توزیع اندازه و غلظت عددی با استفاده از سامانه تحلیل تحرک الکتریکی تفاضلی با استفاده از استاندارد ISO 28439: 2011 تدوین شده‌است.

[120] ISO 27891, Aerosol particle number concentration - Calibration of condensation particle counters

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۲۰۷۲۷: سال ۱۳۹۴، تراکم تعداد ذرات آئروسول - کالیبراسیون شمارشگرهای ذرات چگال شده با استفاده از استاندارد ISO 27891: 2015 تدوین شده‌است.

[121] ISO 13320, Particle size analysis - Laser diffraction methods

[122] ISO 21501-1, Determination of particle size distribution - Single particle light interaction methods - Part 1: Light scattering aerosol spectrometer

**یادآوری** - استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۰۱۰۵: سال ۱۳۸۹، هوای محل کار- ویژگی‌های آبروسل‌های بسیار- ریز/نانو آبروسل‌ها- تعیین توزیع اندازه و غلظت عددی با استفاده از سامانه تحلیل تحرک الکتریکی تفاضلی با استفاده از استاندارد ISO 21501-1: 2009 تدوین شده‌است.

[123] ISO 21363, Nanotechnologies - Measurements of particle size and shape distributions by transmission electron microscopy

**یادآوری** - استاندارد ملی ایران، شماره ۲۲۸۹۳: سال ۱۳۹۹، فناوری نانو- اندازه‌گیری توزیع‌های اندازه و شکل ذرات به‌وسیله میکروسکوپی الکترونی عبوری با استفاده از استاندارد ISO 21363: 2020 تدوین شده‌است.

[124] ISO/TS 10797, Nanotechnologies - Characterization of single-wall carbon nanotubes using transmission electron microscopy

**یادآوری** - استاندارد ملی ایران شماره ۱۸۰۸۵: سال ۱۳۹۳، فناوری نانو- تعیین مشخصات نانولوله‌های کربنی تک جداره با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (tem) با استفاده از استاندارد ISO/TS 10797: 2012 تدوین شده‌است.

[125] ISO 13322-2, Particle size analysis - Image analysis methods - Part 2: Dynamic image analysis methods

**یادآوری** - استاندارد ملی ایران شماره ۲-۱۰۰۹۹: سال ۱۳۸۶، تجزیه و تحلیل اندازه ذره- روش‌های تجزیه و تحلیل تصویری دینامیک با استفاده از استاندارد ISO 13322-2: 2006 تدوین شده‌است.

[126] ISO 29301, Microbeam analysis - Analytical electron microscopy - Methods for calibrating image magnification by using reference materials with periodic structures

**یادآوری** - استاندارد ملی ایران شماره ۷۳۹۸: سال ۱۳۹۹، تحلیل میکروباریکه- میکروسکوپی الکترونی تحلیلی- روش‌های کالیبراسیون بزرگ نمایی تصویر با استفاده از مواد مرجع دارای ساختارهای متناوب با استفاده از استاندارد ISO 29301: 2017 تدوین شده‌است.

[127] ISO 19749, Nanotechnologies - Measurements of particle size and shape distributions by scanning electron microscopy

[128] ISO 17200, Nanotechnology - Nanoparticles in powder form - Characteristics and measurements

**یادآوری** - استاندارد ملی ایران شماره ۱۹۷۸۵: سال ۱۳۹۴، فناوری نانو- نانوذرات پودری شکل- مشخصه‌ها و اندازه‌گیری‌ها با استفاده از استاندارد ISO/TS 17200: 2013 تدوین شده‌است.

[129] ISO/TS 21356-1, Nanotechnologies - Structural characterization of graphene - Part 1: Graphene from powders and dispersions

**یادآوری** - استاندارد ملی ایران شماره ۱-۲۳۱۱۱: سال ۱۴۰۰، فناوری نانو- مشخصه‌یابی ساختاری گرافن- قسمت ۱: گرافن حاصل از پودرها و پراکنه‌ها با استفاده از استاندارد ISO/TS 21356-1: 2021 تدوین شده‌است.

[130] ISO/TS 10798, Nanotechnologies - Characterization of single-wall carbon nanotubes using scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectrometry analysis

**یادآوری** - استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۰۹۵: سال ۱۳۹۰، فناوری نانو- تعیین مشخصات نانولوله‌های کربنی تک جداره با استفاد از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز طیف‌سنجی پرتو ایکس براساس توزیع انرژی (EDX) با استفاده از استاندارد ISO DTS 10798: 2011 تدوین شده‌است.

[131] ISO 16700, Microbeam analysis - Scanning electron microscopy - Guidelines for calibrating image magnification

**یادآوری** - استاندارد ملی ایران شماره ۱۰۱۴۱: سال ۱۳۹۵، تجزیه میکروپرتویی- میکروسکوپ الکترونی روبشی- راهنما برای کالیبراسیون بزرگ‌نمایی تصویر با استفاده از استاندارد ISO 16700: 2004 تدوین شده‌است.

[132] ISO 9277, Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption - BET method

[۱۳۳] استاندارد ملی ایران شماره ۱-۲۲۹۳۸: سال ۱۳۹۹، آزمون غیرمخرب- پراش پرتو ایکس (XRD) از مواد چندبلوری و بی‌شکل- قسمت ۱: اصول کلی

[۱۳۴] استاندارد ملی ایران شماره ۲-۲۲۹۳۸: سال ۱۳۹۹، آزمون غیرمخرب- پراش پرتو ایکس (XRD) از مواد چندبلوری و بی‌شکل- قسمت ۲: روش‌های اجرایی

[135] EN 13925-3:2005, Non-destructive testing - X-ray diffraction from polycrystalline and amorphous materials – Instruments

[136] ISO 13318-1, Determination of particle size distribution by centrifugal liquid sedimentation methods - Part 1: General principles and guidelines

[137] ISO 13318-3, Determination of particle size distribution by centrifugal liquid sedimentation methods - Part 3: Centrifugal X-ray method

**یادآوری** - استاندارد ملی ایران شماره ۳-۱۸۱۴۷: سال ۱۳۹۲، تعیین توزیع اندازه ذره توسط روش‌های سانتریفیوژ پسته نشستی مایع- قسمت ۳- روش سانتریفیوژ توسط اشعه X با استفاده از استاندارد ISO 13318-3: 2004 تدوین شده‌است.

[138] ISO 13318-2, Determination of particle size distribution by centrifugal liquid sedimentation methods - Part 2: Photocentrifuge method

[139] ISO 21501-2, Determination of particle size distribution - Single particle light interaction methods - Part 2: Light scattering liquid-borne particle counter

**یادآوری** - استاندارد ملی ایران شماره ۲-۱۰۱۰۵: سال ۱۳۸۶، تعیین توزیع اندازه ذره- اندازه‌گیری با روش‌های مبتنی بر تعامل نوری ذره منفرد- قسمت دوم- شمارشگر ذره مایع با پراکندگی نوری با استفاده از استاندارد ISO 21501-2: 2007 تدوین شده‌است.

[140] ISO 22412, Particle size analysis - Dynamic light scattering (DLS)

**یادآوری** - استاندارد ملی ایران شماره ۱۶۲۴۷: سال ۱۳۹۶، آنالیز اندازه ذره- پراکندگی نور دینامیک (DLS) با استفاده از استاندارد ISO 22412: 2017 تدوین شده‌است.

[141] ISO 17867, Particle size analysis - Small angle X-ray scattering (SAXS)

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۲۳۱۱۳: سال ۱۴۰۰، آنالیز اندازه ذرات- پراکندگی پرتو ایکس زاویه- کوچک (SAXS) با استفاده از استاندارد ISO 17867: 2020 تدوین شده است.

[142] ISO 19430, Particle size analysis - Particle tracking analysis (PTA) method

[143] ISO/TS 21362, Nanotechnologies - Analysis of nano-objects using asymmetrical-flow and centrifugal field-flow fractionation

[144] ISO/TS 19590, Nanotechnologies - Size distribution and concentration of inorganic nanoparticles in aqueous media via single particle inductively coupled plasma mass spectrometry

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۲۲۳۲۶: سال ۱۳۹۶، فناوری نانو- توزیع اندازه و غلظت نانوذرات معدنی در محیط آبی با استفاده از طیفسنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی تک ذره‌ای با استفاده از استاندارد ISO/TS 19590: 2017 تدوین شده است.

[145] ISO 11952, Surface chemical analysis - Scanning-probe microscopy - Determination of geometric quantities using SPM: Calibration of measuring systems

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۲۲۹۲۲: سال ۱۳۹۹، آنالیز شیمیایی سطح- میکروسکوپی پروبی (کاوندی) روبشی (SPM)- تعیین مقادیر هندسی با استفاده از SPM: کالیبراسیون سامانه‌های اندازه‌گیر با استفاده از استاندارد ISO 11952: 2019 تدوین شده است.

[146] ISO 11775, Surface chemical analysis - Scanning-probe microscopy - Determination of cantilever normal spring constants

[147] ISO 13095, Surface Chemical Analysis - Atomic force microscopy - Procedure for in situ characterization of AFM probe shank profile used for nanostructure measurement

[148] ISO 16531, Surface chemical analysis - Depth profiling - Methods for ion beam alignment and the associated measurement of current or current density for depth profiling in AES and XPS

[149] ISO 18118, Surface chemical analysis - Auger electron spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy - Guide to the use of experimentally determined relative sensitivity factors for the quantitative analysis of homogeneous materials

[150] ISO 16242, Surface chemical analysis - Recording and reporting data in Auger electron spectroscopy (AES)

[151] ISO 29081, Surface chemical analysis - Auger electron spectroscopy - Reporting of methods used for charge control and charge correction

[152] ISO/TR 14187, Surface chemical analysis - Characterization of nanostructured materials



- [153] ISO 15471, Surface chemical analysis - Auger electron spectroscopy - Description of selected instrumental performance parameters
- [154] ISO 18116, Surface chemical analysis - Guidelines for preparation and mounting of specimens for analysis
- [155] ISO 18117, Surface chemical analysis - Handling of specimens prior to analysis
- [156] ISO 20341, Surface chemical analysis - Secondary-ion mass spectrometry - Method for estimating depth resolution parameters with multiple delta-layer reference materials
- [157] ISO 18114, Surface chemical analysis - Secondary-ion mass spectrometry - Determination of relative sensitivity factors from ion-implanted reference materials
- [158] ISO 23830, Surface chemical analysis - Secondary-ion mass spectrometry - Repeatability and constancy of the relative-intensity scale in static secondary-ion mass spectrometry
- [159] ISO 22048, Surface chemical analysis - Information format for static secondary-ion mass spectrometry
- یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱۷۶۶۹: سال ۱۳۹۲، تجزیه شیمیایی سطح - قالب اطلاعات برای طیف‌سنجی جرمی یون ثانویه استاتیک با استفاده از استاندارد ISO 22048: 2004 تدوین شده است.
- [160] ISO 14706, Surface chemical analysis - Determination of surface elemental contamination on silicon wafers by total-reflection X-ray fluorescence (TXRF) spectroscopy
- [161] ISO/TS 18507, Surface chemical analysis - Use of Total Reflection X-ray Fluorescence spectroscopy in biological and environmental analysis
- [162] ISO 16243, Surface chemical analysis - Recording and reporting data in X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)
- [163] ISO 13424, Surface chemical analysis - X-ray photoelectron spectroscopy - Reporting of results of thin-film analysis
- [164] ISO 11357-1, Plastics - Differential scanning calorimetry (DSC) - Part 1: General principles
- یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۷۱۸۶-۱: سال ۱۳۹۴، پلاستیک‌ها - گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) - قسمت ۱: اصول کلی با استفاده از استاندارد ISO 11357-1: 2009 تدوین شده است.
- [165] ISO 11357-7, Plastics - Differential scanning calorimetry (DSC) - Part 7: Determination of crystallization kinetics
- [166] ISO 10640, Plastics - Methodology for assessing polymer photoageing by FTIR and UV/visible spectroscopy

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱۷۴۱۱: سال ۱۳۹۲، پلاستیک‌ها- اصولی برای شناسائی پیرسازی نوری پلیمر به وسیله طیف‌سنجی FTIR و ماوراء بنفش-مرئی با استفاده از استاندارد ISO 10640: 2011 تدوین شده‌است.

[167] ISO/TS 14101, Surface characterization of gold nanoparticles for nanomaterial specific toxicity screening: FT-IR method

[168] ISO 21870, Rubber compounding ingredients - Carbon black - Determination of high-temperature loss on heating by thermogravimetry

[169] ISO/TS 11308, Nanotechnologies - Characterization of carbon nanotube samples using thermogravimetric analysis

[170] ISO/TS 10868, Nanotechnologies - Characterization of single-wall carbon nanotubes using ultraviolet-visible-near infrared (UV-Vis-NIR) absorption spectroscopy

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۷۴۳: سال ۱۳۹۱، فناوری نانو- تعیین مشخصات نانولوله‌های کربنی تک‌جداره با استفاده از طیف‌سنجی جذبی فرابنفش-مرئی- فرو سرخ نزدیک با استفاده از استاندارد ISO/TS 10868: 2011 تدوین شده‌است.

[171] ISO/TS 13278, Nanotechnologies - Determination of elemental impurities in samples of carbon nanotubes using inductively coupled plasma mass spectrometry

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱۷۹۹۳: سال ۱۳۹۹، فناوری نانو- تعیین ناخالصی‌های عنصری در نمونه‌های نانولوله‌های کربنی با استفاده از طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده-القایی با استفاده از استاندارد ISO/TS 13278: 2017 تدوین شده‌است.

[172] ISO 17294-1, Water quality - Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) - Part 1: General guidelines

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۴۹۴۵: سال ۱۳۹۱، کیفیت آب- کاربرد طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی - قسمت ۱: راهنمایی‌های کلی با استفاده از استاندارد ISO 17294-1: 2004 تدوین شده‌است.

[173] ISO 17294-2, Water quality - Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) - Part 2: Determination of selected elements including uranium isotopes

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۲-۱۴۹۴۵: سال ۱۳۹۹، کیفیت آب- کاربرد طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) - قسمت ۲: تعیین عناصر انتخاب‌شده از جمله ایزوتوپ‌های اورانیم با استفاده از استاندارد ISO 17294-2: 2016 تدوین شده‌است.

[174] ISO 11885, Water quality - Determination of selected elements by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES)

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱۰۸۴۸: سال ۱۳۸۷، کیفیت آب- اندازه‌گیری عناصر انتخاب شده به روش اسپکترومتری نشر نوری با پلاسمای جفت شده القایی با استفاده از استاندارد ISO 11885: 2007 تدوین شده‌است.

[175] ISO/TS 12025, Nanomaterials - Quantification of nano-object release from powders by generation of aerosols

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱۷۱۴۹: سال ۱۳۹۲، فناوری نانو- تعیین کمی رهائش نانوشیء از پودرهای ناشی از تولید هواسلها با استفاده از استاندارد ISO/TS 12025: 2012 تدوین شده است.

[176] ISO 12154, Determination of density by volumetric displacement - Skeleton density by gas pycnometry

[177] ISO 8573-8, Compressed air - Part 8: Test methods for solid particle content by mass concentration

[178] ISO 10808, Nanotechnologies - Characterization of nanoparticles in inhalation exposure chambers for inhalation toxicity testing

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱۹۱۱۱: سال ۱۳۹۳، فناوری نانو- تعیین مشخصات نانوذرات در محفظه‌های مواجهه استنشاقی برای آزمون سمیت استنشاقی با استفاده از استاندارد ISO 10808: 2010 تدوین شده است.

[179] ISO 16014-5, Plastics - Determination of average molecular weight and molecular weight distribution of polymers using size-exclusion chromatography - Part 5: Light-scattering method

یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱۶۹۷۷-۵: سال ۱۳۹۲، پلاستیک‌ها- تعیین جرم مولکولی متوسط و توزیع جرم مولکولی پلیمرها با استفاده از کروماتوگرافی اندازه-طرودی- قسمت ۵- استفاده از روش آشکار سازی تفرق نور با استفاده از استاندارد ISO 16014-5: 2012 تدوین شده است.

[180] ISO 18747-1, Determination of particle density by sedimentation methods - Part 1: Isopycnic interpolation approach

[181] ISO 18747-2, Determination of particle density by sedimentation methods - Part 2: Multi-velocity approach

[182] ISO 13099-1, Colloidal systems - Methods for zeta-potential determination - Part 1: Electroacoustic and electrokinetic phenomena

[183] ISO 13099-2, Colloidal systems - Methods for zeta-potential determination - Part 2: Optical methods

[184] ISO 13099-3, Colloidal systems - Methods for zeta potential determination - Part 3: Acoustic methods

[185] ISO 24173, Microbeam analysis - Guidelines for orientation measurement using electron backscatter diffraction

[186] ISO 25498, Microbeam analysis - Analytical electron microscopy - Selected area electron diffraction analysis using a transmission electron microscope

- [187] ISO 13067, Microbeam analysis - Electron backscatter diffraction - Measurement of average grain size
- [188] ISO/TS 17466, Use of UV-Vis absorption spectroscopy in the characterization of cadmium chalcogenide colloidal quantum dots
- یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۲۲۶۱۲: سال ۱۳۹۶، فناوری نانو- استفاده از طیف‌سنجی جذب فرابنفش- مرئی در مشخصه‌یابی نقاط کوانتومی کلوییدی کالکوژنیدی کادمیومی با استفاده از استاندارد ISO 17466: 2015 تدوین شده‌است.
- [۱۸۹] استاندارد ملی ایران شماره ۶-۹۸۱۹: سال ۱۳۹۱، کمیت‌ها و یکاها- قسمت ۶: الکترومغناطیس
- [190] EN 481:1993, Workplace atmospheres - Size fraction definitions for measurement of airborne particles
- [191] EN 15051-1:2013, Workplace exposure - Measurement of the dustiness of bulk materials - Requirements and choice of test methods
- [192] EN 15051-2:2016, Workplace exposure - Measurement of the dustiness of bulk materials - Part 2: Rotating drum method
- [193] EN 15051-3:2013, Workplace exposure. Measurement of the dustiness of bulk materials. Continuous drop method
- [194] ISO 3219-1, Rheology - Part 1: Vocabulary and symbols for rotational and oscillatory rheometry
- [195] ISO 3219-2, Rheology - Part 2: General principles of rotational and oscillatory rheometry
- [196] ISO 1628-1, Plastics - Determination of the viscosity of polymers in dilute solution using capillary viscometers - Part 1: General principles
- [۱۹۶] استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۳۲۴۹: سال ۱۴۰۰، پلاستیک‌ها- تعیین گرانروی پلیمرهای محلول رقیق با استفاده از گرانروی‌سنج‌های مویینه- قسمت ۱: اصول کلی با استفاده از استاندارد ISO 1628-1: 2009 تدوین شده‌است.
- [197] ISO 2884-1, Paints and varnishes - Determination of viscosity using rotary viscometers - Part 1: Cone-and-plate viscometer operated at a high rate of shear
- [198] ISO 2884-2, Paints and varnishes - Determination of viscosity using rotary viscometers - Part 2: Disc or ball viscometer operated at a specified speed
- [199] ISO 12058-1, Plastics - Determination of viscosity using a falling-ball viscometer - Part 1: Inclined-tube method
- یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۷۱۳۸: سال ۱۳۹۸، پلاستیک‌ها- تعیین گرانروی با استفاده از گرانروی‌سنج سقوط گوی- قسمت ۱: روش لوله شیب‌دار با استفاده از استاندارد ISO 12058-1: 2018 تدوین شده‌است.

- [200] ISO 4575, Plastics - Poly(vinyl chloride) pastes - Determination of apparent viscosity using the Severs rheometer
- یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۳۱۲: سال ۱۳۸۷، پلاستیک‌ها- خمیر پلی وینیل کلرید- تعیین گرانشی با استفاده از ریومتر سیورس با استفاده از استاندارد ISO 4575: 2007 تدوین شده است.
- [201] ISO 16790, Plastics - Determination of drawing characteristics of thermoplastics in the molten state
- یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱۷۲۵۷: سال ۱۳۹۲، پلاستیک‌ها- تعیین مشخصه‌های کششی مواد گرم‌نرم در حالت مذاب با استفاده از استاندارد ISO 16790: 2005 تدوین شده است.
- [202] ISO 11443, Plastics - Determination of the fluidity of plastics using capillary and slit-die rheometers
- [203] ISO 6721-10, Plastics - Determination of dynamic mechanical properties - Part 10: Complex shear viscosity using a parallel-plate oscillatory rheometer
- [204] ISO 13145, Rubber - Determination of viscosity and stress relaxation using a rotorless sealed shear rheometer
- یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱۹۲۰۱: سال ۱۳۹۳، لاستیک- تعیین ویسکوزیته و تنش رهایی با استفاده از رئومتر برشی درزبندی شده بی چرخانه با استفاده از استاندارد ISO 13145: 2012 تدوین شده است.
- [205] ISO/TS 21357, Nanotechnologies - Evaluation of the mean size of nano-objects in liquid dispersions by static multiple light scattering (SMLS)
- [206] ISO/TR 13097, Guidelines for the characterization of dispersion stability
- [207] ISO 7579, Dyestuffs - Determination of solubility in organic solvents - Gravimetric and photometric methods
- یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۶۰۳۸: سال ۱۳۸۹، مواد رنگزا-تعیین میزان حلالیت در حلال‌های آلی-روش وزنی با استفاده از استاندارد ISO 7579: 2009 تدوین شده است.
- [208] ISO/TR 13014, Nanotechnologies - Guidance on physico-chemical characterization of engineered nanoscale materials for toxicologic assessment
- یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۲۱۲۰۶: سال ۱۳۹۵، فناوری نانو- راهنمای مشخصه‌یابی فیزیکی-شیمیایی مواد نانو مقیاس مهندسی شده برای ارزیابی توکسیکولوژیک با استفاده از استاندارد ISO/TR 13014: 2012 تدوین شده است.
- [209] ISO 14577-1, Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters - Part 1: Test method
- یادآوری - استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۶۹۶-۱: سال ۱۳۹۵، مواد فلزی-آزمون سختی و خواص مواد به روش فرورفتگی ابزاری- قسمت ۱- روش آزمون با استفاده از استاندارد ISO 14577-1: 2015 تدوین شده است.
- [210] ISO 14577-2, Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters - Part 2: Verification and calibration of testing machines

**یادآوری** - استاندارد ملی ایران شماره ۲-۱۲۶۹۶: سال ۱۳۹۵، مواد فلزی- آزمون سختی و خواص مواد به روش فرورفتگی ابزاری- قسمت ۲- تصدیق و کالیبراسیون دستگاه‌های آزمون با استفاده از استاندارد ISO 14577-2: 2015 تدوین شده‌است.

[211] ISO 14577-3, Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters - Part 3: Calibration of reference blocks

**یادآوری** - استاندارد ملی ایران شماره ۳-۱۲۶۹۶: سال ۱۳۹۵، مواد فلزی- آزمون سختی و خواص مواد به روش فرورفتگی ابزاری- قسمت ۳- کالیبراسیون بلوک‌های مرجع با استفاده از استاندارد ISO 14577-3: 2015 تدوین شده‌است.

[212] ISO 14577-4, Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters - Part 4: Test method for metallic and non-metallic coatings

**یادآوری** - استاندارد ملی ایران شماره ۴-۱۲۶۹۶: سال ۱۳۹۵، مواد فلزی- آزمون سختی و خواص مواد به روش فرورفتگی ابزاری- قسمت ۴- روش آزمون پوشش‌های فلزی و غیرفلزی با استفاده از استاندارد ISO 14577-4: 2016 تدوین شده‌است.

[213] ISO/TR 11811, Nanotechnologies - Guidance on methods for nano- and microtribology measurements

**یادآوری** - استاندارد ملی ایران شماره ۱۸۰۸۶: سال ۱۳۹۳، فناوری نانو- راهنمای روش‌هایی برای اندازه‌گیری نانو و میکروتربیولوژی با استفاده از استاندارد ISO/TR 11811: 2012 تدوین شده‌است.