INSO
(Std. No.)
.....
2022

جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران
Iran National Standardization Organization

استاندارد ملی ایران
(شمارهٔ استاندارد)
.....
۱۴۰۱

# فناوری نانو - پوشش‌های نانومقیاس سخت- طبقه‌بندی براساس مشخصه‌های هندسی و سختی

# Nanotechnology- Hard nanoscale coatings- Classification based on geometric and hardness characteristics

ICS: 70.120

سازمان ملی استاندارد ایران

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

صندوق‌پستی: ۶۱۳۹-۱۴۱۵۵ تهران- ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۰۸۰ و ۸۸۸۸۷۱۰۳

کرج، شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۱۶۳-۳۱۵۸۵ کرج - ایران

تلفن: ۸-۳۲۸۰۶۰۳۱ (۰۲۶)

دورنگار: ۳۲۸۰۸۱۱۴ (۰۲۶)

رایانامه: standard@inso.gov.ir

وبگاه: http://www.inso.gov.ir

**Iranian National Standardization 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

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

**به نام خدا**

## آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

سازمان ملی استاندارد ایران به موجب بند یک مادهٔ ۷ قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد ، ابلاغ‌شده در دی ماه ۱۳۹۶، وظیفهٔ تعیین، تدوین، به‌روزرسانی و نشر استانداردهای ملی 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 منصفانهٔ 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 پیشنهادها در کمیتهٔ 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 درکمیته ملی طرح، بررسی و درصورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شود که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ تدوین و در کمیتهٔ 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)[1]، کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)[2] و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)[3] است و به عنوان تنها رابط[4] کمیسیون کدکس غذایی (CAC)[5] 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 استاندارد کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری کند. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینهٔ 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، گواهینامهٔ 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 - پوشش‌های نانومقیاس سخت- طبقه‌بندی براساس مشخصه‌های هندسی و سختی»

| **رئیس:** | **سمت و/یا محل اشتغال:** |
|---|---|
| دولتی، ابوالقاسم<br>(دکتری مهندسی مواد) | عضو هیئت علمی- دانشگاه صنعتی شریف |
| **دبیر:** | |
| علم‌خواه، حسن<br>(دکتری فناوری نانو-نانومواد) | عضو هیئت علمی- دانشگاه بوعلی سینا |
| **اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)** | |
| اسلامی‌پور، الهه<br>(کارشناسی ارشد زیست‌شناسی سلولی مولکولی) | کارشناس- گروه استاندارد و ارزیابی محصولات ستاد ویژه توسعه فناوری نانو |
| اشرفی‌زاده، سید فخرالدین<br>(دکتری مهندسی مواد) | رئیس و عضو هیئت مدیره- انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران |
| افشار، زهرا<br>(کارشناسی ارشد مهندسی مواد) | کارشناس تحقیق و توسعه- شرکت فناوران سخت آرا |
| ذوالریاستین، اشکان<br>(دکتری مهندسی مواد) | عضو هیئت علمی- پژوهشگاه نیرو |
| سهرابی جهرمی، ابوذر<br>(دکتری نانوفناوری-نانومواد) | رئیس هیئت مدیره- شرکت راصد توسعه فناوری‌های پیشرفته |
| سیفی، مهوش<br>(کارشناسی ارشد مدیریت دولتی) | مشاور- گروه استاندارد و ارزیابی محصولات ستاد ویژه توسعه فناوری نانو |
| غضنفری، سید محمدحسین<br>(کارشناسی ارشد مواد-فناوری نانو) | کارشناس- گروه استاندارد و ارزیابی محصولات ستاد ویژه توسعه فناوری نانو |
| گل‌زردی، سمیرا<br>(کارشناسی ارشد مهندسی مواد-سرامیک) | کارشناس- گروه استاندارد و ارزیابی محصولات ستاد ویژه توسعه فناوری نانو |
| منتظری، مانی<br>(کارشناسی ارشد مهندسی مواد) | مدیرعامل- شرکت نوین فن سنجش آویسا |
| **ویراستار:** | |
| سیفی، مهوش<br>(کارشناسی ارشد مدیریت دولتی) | مشاور- گروه استاندارد و ارزیابی محصولات ستاد ویژه توسعه فناوری نانو |

## فهرست مندرجات


| عنوان | صفحه |
|---|---|
| پیش‌گفتار | و |
| مقدمه | ز |
| ۱ هدف و دامنه کاربرد | ۱ |
| ۲ مراجع الزامی | ۱ |
| ۳ اصطلاحات و تعاریف و کوته‌نوشت‌ها | ۲ |
| ۳-۱ اصطلاحات و تعاریف پوشش | ۲ |
| ۳-۲ اصطلاحات و تعاریف نهشت | ۵ |
| ۳-۳ کوته‌نوشت‌ها | ۸ |
| ۴ طبقه‌بندی پوشش‌های نانومقیاس سخت | ۸ |
| ۴-۱ کلیات | ۸ |
| ۴-۲ تقسیم‌بندی براساس معیار سختی | ۸ |
| ۴-۳ تقسیم‌بندی براساس ضخامت پوشش | ۹ |
| ۴-۴ تقسیم‌بندی براساس معماری ساختار پوشش | ۹ |
| ۵ روش‌های نهشت پوشش‌های نانومقیاس سخت | ۱۱ |
| ۶ روش‌های مشخصه‌یابی ابعاد نانومتری پوشش‌های نانومقیاس سخت | ۱۲ |
| پیوست الف (آگاهی‌دهنده) نحوه ارزیابی سختی با میکرو ویکرز | ۱۳ |
| پیوست ب (آگاهی‌دهنده) تصاویر طرحواره‌ای انواع معماری ساختار پوشش‌ها | ۱۵ |
| کتاب نامه | ۱۷ |

## پیش‌گفتار

استاندارد «فناوری نانو- پوشش‌های نانومقیاس سخت- طبقه‌بندی براساس مشخصه‌های هندسی و سختی» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط تهیه و تدوین شده‌است، در صد و شانزدهمین اجلاسیه کمیتهٔ ملی استاندارد فناوری نانو مورخ ۱۴۰۱/۰۵/۱۰ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک مادهٔ ۷ قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد، ابلاغ‌شده در دی ماه ۱۳۹۶، به‌عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

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

منابع و مأخذی که برای تهیه و تدوین این استاندارد مورداستفاده قرار گرفته به‌شرح زیر است:

**۱**- استاندارد ملی ایران شماره ۲۳۱۴۳: سال ۱۴۰۱، فناوری نانو- پوشش‌های نانومقیاس سخت- مشخصه‌یابی و روش های آزمون

2- ISO/TR 11360, Nanotechnologies — Methodology for the classification and categorization of nanomaterials

3- ISO 21874: 2019(E), PVD multi-layer hard coatings — Composition, structure and properties

4- ISO 9220, Metallic coatings — Measurement of coating thickness — Scanning electron microscope method

5- VDI 3824-1: 2002, PVD and CVD hard coatings — Quality assurance — Characteristic profiles and fields of application of hard coatings

## مقدمه

«پوشش‌های نانومقیاس سخت» به پوشش‌هایی گفته می‌شود که دارای دو مشخصه اصلی باشند. مشخصه اول اینکه ضخامت آن‌ها یا اجزای سازنده آن‌ها نانومقیاس باشد و مشخصه دوم آن‌ها، میزان سختی پوشش بیش از ۱۲ گیگاپاسکال (یا ۱۲۰۰ ویکرز) باشد (مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۲۳۱۴۳: سال ۱۴۰۱). از آنجاکه پوشش‌های نانومقیاس سخت، خواص و مشخصات متفاوتی نسبت به پوشش‌های متداول دارند، لذا تقاضای زیادی برای استفاده از این پوشش‌ها در صنعت وجود دارد. با توجه به اینکه تنوع پوشش‌های نانومقیاس سخت زیاد است، برای شناسایی آن‌ها لازم است تقسیم‌بندی مناسبی انجام شود. این استاندارد شامل طبقه‌بندی انواع پوشش‌های نانومقیاس سخت از نظر میزان سختی، ضخامت و معماری ساختار آن‌ها است. هم‌چنین طبقه‌بندی انواع روش‌های مشخصه‌یابی بُعد نانومتری و روش‌های اعمال پوشش‌های مختلف با توجه به معماری آن‌ها ارائه شده‌است.

باتوجه به اینکه تاکنون استانداردی برای طبقه‌بندی و مشخصه‌یابی بُعد نانومتری پوشش‌های نانومقیاس سخت تدوین نشده‌است، بنابراین استاندارد حاضر به توسعه صنعتی پوشش‌های نانومقیاس سخت کمک خواهد کرد. بنابراین هدف نهایی از تدوین این استاندارد اولاً، اثبات نانومقیاس بودن پوشش (براساس طبقه‌بندی معماری ساختار پوشش) با استفاده از روش‌های مشخصه‌یابی پیشنهادی ارائه‌شده و نیز آشنایی با روش‌های پیشنهادی تولید آن است. در ثانی، آگاهی صنعتگران و فناوران از اینکه آیا پوشش مورد ارزیابی، در دسته‌بندی «پوشش نانومقیاس سخت» قرار می‌گیرد یا خیر.

# فناوری نانو- پوشش نانومقیاس سخت- طبقه‌بندی براساس مشخصه‌های هندسی و سختی

## ۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، طبقه‌بندی پوشش‌های نانومقیاس سخت و ارائه روش‌های پیشنهادی مناسب و قابل‌اجرا برای اعمال پوشش‌ها و نیز روش‌های پیشنهادی مشخصه‌یابی بُعد نانومتری هر یک از آن‌ها است. در این استاندارد، پوشش‌های نانومقیاس سخت براساس میزان سختی، ضخامت و معماری پوشش طبقه‌بندی شده‌اند که می‌تواند به صنعتگران و متقاضیان این امکان را بدهد که برحسب نیاز بتوانند پوشش مدنظر خود را انتخاب کنند. علاوه‌براین، با ارائه انواع روش‌های مشخصه‌یابی بُعد نانومقیاس، بهترین و مناسب‌ترین روش را برای تعیین مشخصات هندسی پوشش موردنظر انتخاب کنند.

## ۲ مراجع الزامی

در مراجع زیر ضوابطی وجود دارد که در متن این استاندارد به صورت الزامی به آنها رجوع شده است. بدین ترتیب، آن ضوابط جزئی از این استاندارد محسوب می‌شوند.

درصورتی‌که به مرجعی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدید نظرهای بعدی آن برای این استاندارد الزام آور نیست. در مورد مراجعی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آنها ارجاع داده شده، همواره آخرین تجدید نظر و اصلاحیه‌های بعدی برای این استاندارد الزام آور است.

استفاده از مراجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است:

**۲-۱** استاندارد ملی ایران شماره ۱۱-۸۰۰۰۴: سال۱۳۹۶، فناوری نانو - واژه‌نامه - قسمت ۱۱: نانولایه، نانوپوشش، نانوفیلم و اصطلاحات مرتبط

2-2 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 ۱۳۹۶ 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.

2-3 ISO/TS 80004-8: 2020, Nanotechnologies – Vocabulary- Part 8: Nanomanufacturing processes.

**یادآوری**- استاندارد ملی ایران شماره ۸-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱، فناوری نانو - واژه نامه - قسمت ۸: فرآیندهای نانوساخت، با استفاده از استاندارد ISO 80004-8: 2020 تدوین شده‌است.

## ۳ اصطلاحات و تعاریف و کوته‌نوشت‌ها

در این استاندارد، اصطلاحات با تعاریف زیر به‌کار می‌رود.

### ۳-۱ اصطلاحات و تعاریف پوشش

**۳-۱-۱**
**لایه**

**layer**

ماده گسسته که در یک بعد محدود است و در داخل یا سطح یک فاز چگال قرار دارد.

[منبع: زیربند۳-۱-۲، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷]

**۳-۱-۲**
**چندلایه**

**multilayer**

سامانه‌ای از *لایه‌های* (۳-۱-۱) متوالی یا تک‌لایه‌ها است.

[منبع: زیربند ۳-۱-۳، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷]

**۳-۱-۳**
**نانومقیاس**

**nanoscale**

محدوده طول تقریبا از یک نانومتر تا صد نانومتر است.

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

**۳-۱-۴**
**نانوپوشش**

**nanocoating**

پوششی با ضخامت در مقیاس نانو است.

[منبع: زیربند ۳-۲-۲-۲، استاندارد ملی ایران- ایزو ۱۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷]

**۳-۱-۵**
**نانولایه**

**nanolayer**

*لایه‌ای* (۳-۱-۱) از مواد با ضخامت *نانومقیاس* (۳-۱-۳) است.

[منبع: زیربند ۳-۲-۲-۱، استاندارد ملی ایران- ایزو ۱۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷]

**۳-۱-۶**

**پوشش نانولایه**

**nanolayered coating**

پوشش چندلایه که ضخامت کل لایه‌های آن در محدوده *نانومقیاس* (۳-۱-۳) باشد [1].

**۳-۱-۷**

**پوشش نانومقیاس**

**nanoscale coating**

پوشش با ضخامت، ساختار و یا حداقل یک جزء نانومتری است.

[منبع: زیربند ۳-۳، استاندارد ملی ایران شماره ۲۳۱۴۳: سال ۱۴۰۱]

**۳-۱-۸**

**پوشش نانوساختار**

**nanostructured coating**

پوششی دارای ساختار داخلی یا ساختار سطحی در مقیاس نانو است.

[منبع: زیربند۳-۳-۲، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷]

**۳-۱-۹**

**پوشش نانودانه‌ای**

**nanograin coating**

پوشش با اندازه دانه‌های در محدوده نانومقیاس است [2].

**۳-۱-۱۰**

**پوشش گرادیانی**

**graded coating**

پوششی با تغییر تدریجی در ساختار یا ترکیب شیمیایی آن از فصل مشترک تا سطح خارجی است [3].

**۳-۱-۱۱**

**پوشش لایه‌ای اَبَرشبکه**

**superlattice multilayer coating**

پوشش لایه‌ای با لایه‌های با ضخامت *نانومقیاس* (۳-۱-۳) و دارای مطابقت بلوری میان لایه‌ها است [4].

**۳-۱-۱۲**

**پوشش نانو چندسازه‌ای (کامپوزیتی)**

**nanocomposite coating**

پوشش جامد حاوی مخلوطی از دو یا چند ماده جدایش‌یافته فازی، با یک یا چند فاز *نانومقیاس* (۳-۱-۳) است.

[منبع: زیربند ۳-۳-۵، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره۱۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۷]

**۳-۱-۱۳**

**پوشش نانومقیاس سخت**

**hard nanoscale coating**

پوششی با ضخامت، ساختار و یا حداقل یک جزء نانومتری با سختی موردنظر است.

**۳-۱-۱۴**

**پوشش نانوساختار سخت**

**hard nanostructured coating**

پوشش با اجزاء داخلی یا سطحی در مقیاس نانو و سخت است.

[منبع: زیربند ۳-۷، استاندارد ملی ایران شماره ۲۳۱۴۳: سال ۱۴۰۱]

**۳-۱-۱۵**

**پوشش نانوساختار فوق‌سخت**

**super-hard nanostructured coating**

پوشش نانوساختار فوق‌سخت پوششی مشابه پوشش نانوساختار سخت و دارای محدوده سختی مشابه الماس برای مواد مهندسی سخت است.

[منبع: زیربند ۳-۸، استاندارد ملی ایران شماره ۲۳۱۴۳: سال ۱۴۰۱]

**۳-۱-۱۶**

**پوشش اَبَر سخت**

**ultra-hard coating**

پوشش با سختی بیش از ۸۰ گیگاپاسکال که رقیب عملکرد الماس است [5].

**۳-۱-۱۷**

**پوشش نانوستونی**

**nanocolumnar coating**

پوششی با ساختار ستونی با ابعاد نانومقیاس است.

**۳-۱-۱۸**

**پوشش متخلخل نانوستونی**

**nanocolumnar porous coating**

پوشش با ساختار ستونی متخلخل و با ابعاد *نانومقیاس (۳-۱-۳)* است.

**۳-۱-۱۹**

**معماری پوشش**

**architecture of coating**

طراحی و چیدمان اجزای داخلی پوشش در سطح خارجی و یا سطح مقطع پوشش است.

## ۳-۲ اصطلاحات و تعاریف نهشت

**۳-۲-۱**

**نهشت فیزیکی بخار**

**physical vapor deposition (PVD)**

فرایند نهشت یک پوشش با تبخیر و سپس چگالش یک عنصر یا ترکیب (معمولاً در یک خلأ بالا) است.

[منبع: زیربند ۸-۲-۱۴، استاندارد ملی ایران - ایزو شماره ۸-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

**۳-۲-۲**

**نهشت شیمیایی بخار**

**chemical vapor deposition (CVD)**

نهشت یک ماده جامد روی یک بستره به‌وسیله واکنش شیمیایی، ترکیبی از چند پیش‌ماده گازی یا مخلوطی از پیش‌ماده‌ها است که معمولاً به وسیله گرما آغاز می‌شود.

[منبع: زیربند ۸-۲-۴، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۸-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

**۳-۲-۳**

**نهشت لایه اتمی**

**atomic layer deposition (ALD)**

فرایند ساخت لایه‌های نازک یکپارچه و یکنواخت از طریق نهشت چرخه‌ای مواد با واکنش‌های خودتخریب سطحی که کنترل ضخامت در مقیاس اتمی را ممکن می‌کنند.

**یادآوری**- این فرایند اغلب شامل استفاده از حداقل دو واکنش متوالی برای تکمیل یک چرخه است که می‌تواند برای ایجاد ضخامت موردنظر چندین بار تکرار شود.

[منبع: زیربند ۸-۲-۲، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۸-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

**۳-۲-۴**

**نهشت الکترولس**

**electroless deposition**

نهشت خودکاتالیز مواد از یون‌های موجود در محلول و در حضور عامل کاهنده قابل‌حل، روی یک سطح جامد است.

[منبع: زیربند ۸-۲-۸، استاندارد ملی ایران- ایزو ۸-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

**۵-۲-۳**

**آبکاری**

**electroplating**

نهشت مواد در اثر کاهش الکتروشیمیایی یون‌های موجود در محلول روی سطح یک الکترود است.

[منبع: زیربند ۸-۲-۷، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۸-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

**۶-۲-۳**

**تبخیر**

**evaporation**

فرایندی است که در آن ماده‌ای با گرمادهی در شرایط خلأ بالا یا بسیار بالا برای نهشت بعدی روی بستره تبخیر
می‌شود.

[منبع: زیربند ۸-۲-۱۰، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۸-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

**۷-۲-۳**

**پوشش‌دهی غوطه‌وری**

**dip coating**

ایجاد یک لایه نازک با فرو بردن یک بستره در یک محلول حاوی ماده موردنظر است.

[منبع: زیر بند ۸-۲-۶، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۸-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

**۸-۲-۳**

**پوشش‌دهی چرخشی**

**spin coating**

ایجاد یک لایه نازک از نهشت یک ماده موجود در محلول بر روی یک بستره در حال چرخش با استفاده از نیروی گریز از مرکز است.

[منبع: زیربند ۸-۲-۱۷، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۸-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

**۹-۲-۳**

**افشانش گرمایی**

**thermal spray**

نهشت نانوذرات برای تشکیل یک لایه نازک جامد از یک منبع نانوذرات مبتنی بر احتراق یا پلاسما است.

[منبع: زیربند ۸-۲-۱۶، استاندارد ملی ایران-ایزو شماره ۸-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

**۱۰-۲-۳**

**نهشت کندوپاشی**

**sputter deposition**

*نهشت فیزیکی بخار* (۳-۲-۱) با استفاده از ذرات پرانرژی برای انتقال اتم‌های یک ماده هدف به یک بستره است.

[منبع: زیربند ۸-۲-۱۹، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۸-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

**۱۱-۲-۳**

**آندایز الکتروشیمیایی**

**electrochemical anodization**

فرایندی است که در آن، آند به‌طور هم‌زمان اکسید و حکاکی می‌شود و در نتیجه، منافذی *نانومقیاس* (۳-۱-۳) معمولاً با درجه نظم و کنترل‌پذیری بالا ایجاد می‌شود.

**یادآوری**- این فرایند هم‌چنین ممکن است به عنوان حکاکی آندی نیز اشاره شود.

[منبع: زیربند ۷-۶-۲، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۸-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

**۱۲-۲-۳**

**فرایند سُل‌ژل**

**sol-gel processing**

تبدیل یک محلول شیمیایی یا تعلیقه کلوئیدی (سُل) به یک شبکه یکپارچه (ژل)، که می‌تواند متراکمتر شود.

[منبع: زیربند ۷-۴-۴، استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۸-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

**۳-۲-۱۳**

**کاشت یونی**

**ion implantation**

استفاده از یون‌های پرانرژی شار برخوردی برای اصلاح ماده سازنده سطح با تخریب و تبلور مجدد است.

[منبع: زیربند ۷-۵-۸، استاندارد ملی ایران- ایزو ۸-۸۰۰۰۴: سال ۱۴۰۱]

## ۳-۳ کوته‌نوشت‌ها

| کوته‌نوشت | معادل انگلیسی | معادل فارسی |
|---|---|---|
| AFM | Atomic Force Microscope | میکروسکوپ نیروی اتمی |
| FESEM | Field Emission Secondary Electron Microscope | میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی |
| PACVD | Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition | نهشت شیمیایی بخار به کمک پلاسما |
| PEO | Plasma Electrolytic Oxidation | اکسایش الکترولیت پلاسمایی |
| SEM | Secondary Electron Microscope | میکروسکوپ الکترونی روبشی |
| TEM | Transmission Electron Microscope | میکروسکوپ الکترونی عبوری |

# ۴ طبقه‌بندی پوشش‌های نانومقیاس سخت

## ۴-۱ کلیات

به‌دلیل تنوع بالا در پوشش‌های نانومقیاس سخت و لزوم شناخت جامع آن‌ها، لازم است طبقه‌بندی مناسبی انجام شود. در این بخش، پوشش‌های نانومقیاس سخت براساس معیار سختی پوشش، ضخامت پوشش و معماری ساختار آنها طبقه‌بندی می‌شوند.

## ۴-۲ تقسیم‌بندی براساس معیار سختی

به‌دلیل ساختار نانومتری، پوشش‌های نانومقیاس سخت می‌توانند خواص مکانیکی از جمله سختی را بهبود بخشند. سختی یکی از مهم‌ترین موارد در بحث خواص مکانیکی پوشش است. یکی از عمده‌ترین تقاضای صنعت، دستیابی به قطعات، قالب‌ها و ابزارهای دارای پوشش‌های سخت‌تر است. بر این اساس می‌توان پوشش‌های نانومقیاس سخت را مطابق جدول ۱، به سه دسته تقسیم‌بندی کرد. در خصوص این جدول دو نکته قابل ذکر است:

**الف**- پوشش‌های نانومقیاس سخت به پوشش‌هایی اطلاق می‌شود که سختی آنها بالای ۱۲۰۰ ویکرز (یا ۱۲ گیگاپاسکال) باشد. لذا اگر پوششی دارای سختی کمتر از ۱۲۰۰ ویکرز (یا ۱۲ گیگاپاسکال) باشد در محدوده دامنه کاربرد این استاندارد قرار ندارد.

**ب**- پوشش‌های متداول صنعتی در محدوده پوشش‌های سخت (سختی بین ۱۲۰۰ ویکرز تا ۴۰۰۰ ویکرز) قرار دارند. پوشش‌های «فوق‌سخت» و «اَبَر سخت» بیشتر در منابع علمی و تحقیقاتی ذکر شده‌است و کمتر در صنایع کشور مورداستفاده تجاری قرار می‌گیرد.

**جدول ۱- طبقه‌بندی پوشش‌ها براساس سختی (مطابق استاندارد ۲۳۱۴۳: سال ۱۴۰۱)**

| عنوان طبقه | محدوده سختی | |
|---|---|---|
| | برحسب ویکرز | برحسب گیگاپاسکال |
| غیرسخت[1] (خارج از محدوده استاندارد حاضر) | ۱۲۰۰ > سختی | ۱۲ > سختی |
| سخت | ۴۰۰۰ > سختی ≥ ۱۲۰۰ | ۴۰ > سختی ≥ ۱۲ |
| فوق‌سخت | ۸۰۰۰ > سختی ≥ ۴۰۰۰ | ۸۰ > سختی ≥ ۴۰ |
| ابرسخت | ۸۰۰۰ ≤ سختی | ۸۰ ≤ سختی |
| 1- Non-hard | | |

### ۳-۴ تقسیم‌بندی براساس ضخامت پوشش

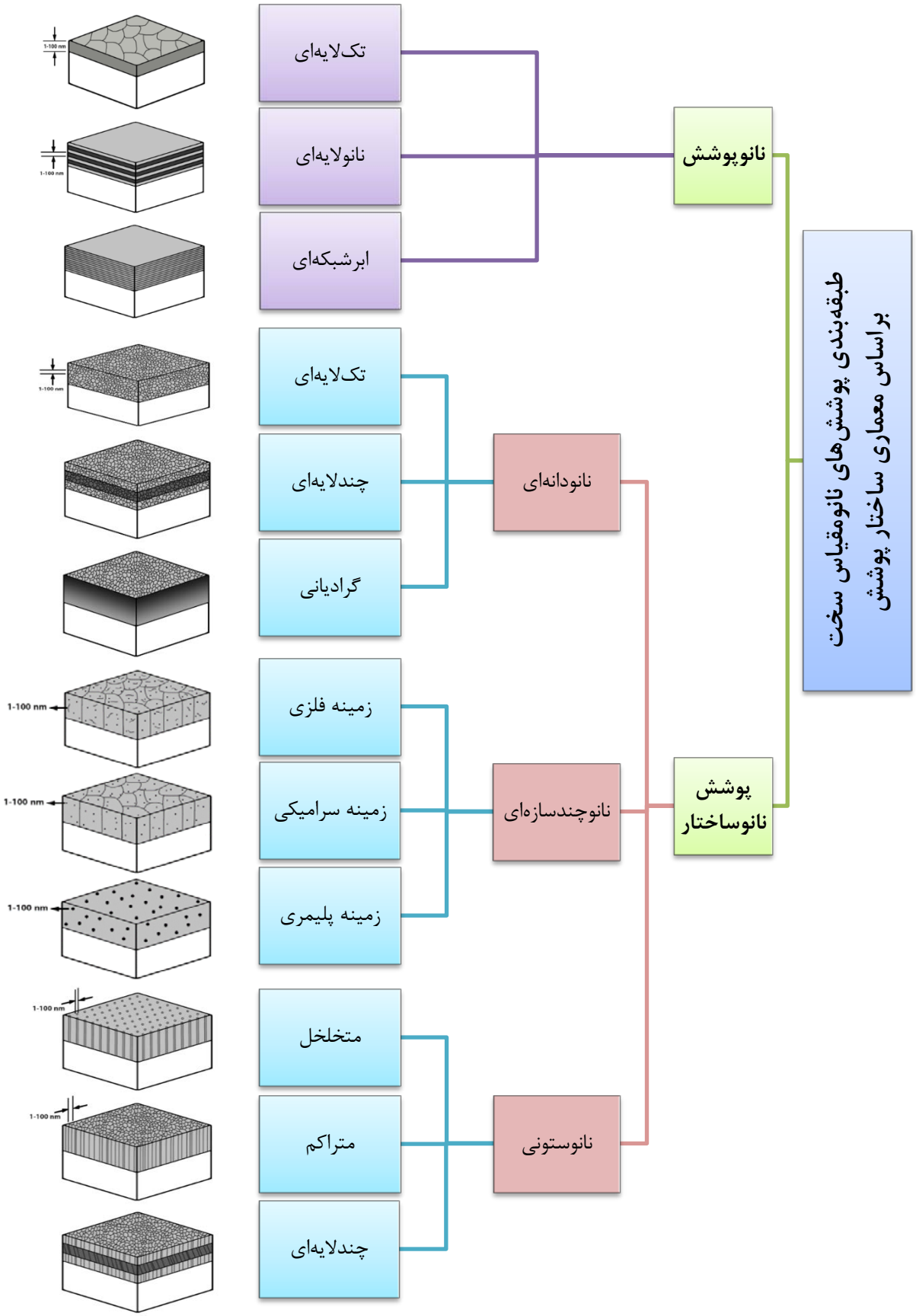
با توجه به حوزه استفاده و کاربرد پوشش‌های نانومقیاس سخت، به ضخامت‌های متفاوتی از پوشش نیاز است تا بتواند بهترین عملکرد را داشته باشد. در مواردی که این نوع پوشش در کاربردهای مقاوم به سایش و خوردگی و امثال آن به‌کار می‌رود، به ضخامت بیشتری از پوشش نیاز است. اما در کاربردهای صنعت اُپتیک و الکترونیک، پوشش‌ها از ضخامت کمتری برخوردار هستند. بنابراین طبقه‌بندی پوشش‌های نانومقیاس سخت براساس ضخامت مطابق جدول ۲ است.

**جدول ۲- طبقه‌بندی پوشش‌های سخت براساس ضخامت (حوزه کاربردی مهندسی مواد و مهندسی مکانیک)**

| طبقه | عنوان طبقه پوشش | محدوده ضخامت پوشش |
|---|---|---|
| طبقه ۱ | پوشش فوق‌نازک (نانوپوشش) | ۱ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر |
| طبقه ۲ | پوشش نازک | ۱۰۰ نانومتر تا ۱۰ میکرومتر |
| طبقه ۳ | پوشش ضخامت متوسط | ۱۰ میکرومتر تا ۵۰ میکرومتر |
| طبقه ۴ | پوشش ضخیم | بیشتر از ۵۰ میکرومتر |

### ۴-۴ تقسیم‌بندی براساس معماری ساختار پوشش

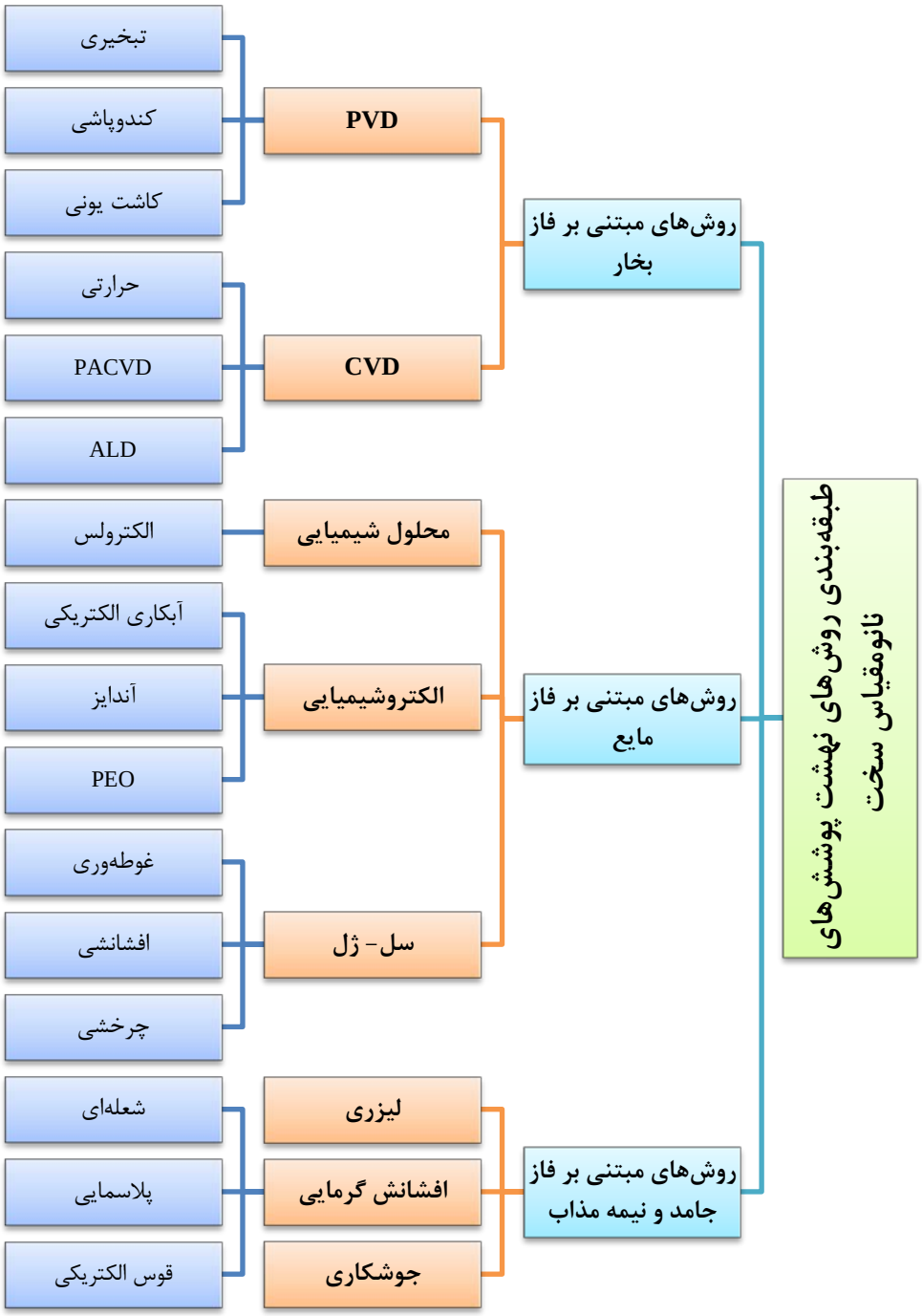
پوشش‌های نانومقیاس سخت براساس معماری پوشش طبقه‌بندی می‌شوند. پوشش‌ها می‌توانند ساختارها، چیدمان و آرایش‌های مختلفی داشته باشند. شکل ۱، طبقه‌بندی پوشش‌های نانومقیاس سخت را براساس معماری ساختار پوشش نشان می‌دهد. تصاویر طرحواره‌ای انواع معماری ساختار پوشش‌ها با ابعاد بزرگتر در پیوست **ب** ارائه شده‌است.




**شکل ۱- طبقه‌بندی پوشش‌های نانومقیاس سخت براساس معماری ساختار پوشش**

## ۵ روش‌های نهشت پوشش‌های نانومقیاس سخت

برای ایجاد پوشش‌های نانومقیاس سخت، روش‌های متنوعی گزارش شده است. یکی از جامع‌ترین دسته‌بندی برای روش‌های نهشت پوشش‌های نانومقیاس سخت، بر مبنای محیط ایجاد پوشش است که در سه گروه روش‌های مبتنی بر بخار، روش‌های مبتنی بر مایع و روش‌های مبتنی بر جامد (یا نیمه مذاب) طبقه‌بندی می‌شوند. در شکل ۲، طبقه‌بندی روش‌های نهشت پوشش‌های نانومقیاس سخت ذکر شده‌است.




**شکل ۲- طبقه‌بندی روش‌های نهشت پوشش‌های نانومقیاس سخت**

## ۶ روش‌های مشخصه‌یابی ابعاد نانومتری پوشش‌های نانومقیاس سخت

برای شناسایی و اندازه‌گیری اندازه نانواشیاء (نانودانه، نانولایه، نانوذره) در پوشش نانومقیاس سخت، از دستگاه SEM/FESEM براساس استاندارد ملی ایران شماره ۲۱۲۵۹: سال ۱۳۹۵ [۶]، دستگاه TEM با استفاده از استاندارد ملی ایران شماره ۲۱۹۵۰: سال ۱۳۹۶ [۷] و دستگاه AFM براساس استاندارد ملی ایران شماره ۱۵۶۰۳: سال ۱۳۹۷ [۸] می‌توان استفاده کرد. همچنین به‌منظور اندازه‌گیری دقیق ضخامت نانوپوشش‌ها و اندازه اجزاء پوشش، از دستگاه FESEM و یا TEM استفاده می‌شود. مراحل آماده‌سازی نمونه مطابق با استاندارد ISO 9220 است. اندازه‌گیری ضخامت پوشش از روی سطح مقطع پوشش مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۲۷: سال ۱۳۸۸ [۹] انجام می‌شود. نتایج حاصل از اندازه‌گیری اندازه اجزاء و ضخامت پوشش باید به این‌صورت باشد که در نانوپوشش‌ها، ضخامت پوشش (یا تک‌لایه) کمتر از ۱۰۰ نانومتر و در پوشش‌های نانوساختار اندازه یک یا چند جزء پوشش کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد. در جدول ۳، نمونه روش‌های پیشنهادی نهشت و مشخصه‌یابی براساس معماری‌های مختلف پوشش‌های نانومقیاس سخت ارائه شده‌است.

همچنین به‌منظور اندازه‌گیری سختی پوشش‌های نانومقیاس سخت می‌توان از استاندارد ملی ایران شماره ۲۳۱۴۳: سال ۱۴۰۱ استفاده کرد و یا به پیوست **الف** مراجعه کرد.

**جدول ۳- نمونه روش‌های پیشنهادی نهشت و مشخصه‌یابی بر اساس معماری ساختاری پوشش‌های نانومقیاس سخت**

| انواع معماری ساختار پوشش | | نمونه روش‌های پیشنهادی نهشت پوشش | نمونه روش‌های پیشنهادی مشخصه‌یابی |
|---|---|---|---|
| بخش اصلی | زیربخش‌ها | | |
| نانوپوشش | تک‌لایه‌ای | ALD – PVD | FESEM |
| | نانولایه‌ای | PACVD – PVD – ALD - آبکاری الکتریکی | FESEM – TEM |
| | ابرشبکه‌ای | ALD – PVD | FESEM – TEM |
| پوشش نانوساختار | نانودانه‌ای تک‌لایه‌ای | PACVD – PVD – ALD - آبکاری الکتریکی | FESEM |
| | نانودانه‌ای چندلایه‌ای | PACVD – PVD – ALD - آبکاری الکتریکی | FESEM |
| | نانودانه‌ای گرادیانی | PACVD – PVD – ALD - آبکاری الکتریکی | FESEM |
| | نانوچندسازه‌ای زمینه فلزی | آبکاری الکتریکی، الکترولس و افشانش گرمایی | AFM – FESEM |
| | نانوچندسازه‌ای زمینه سرامیکی | PACVD – PVD – PEO - آندایز الکتروشیمیایی | TEM – AFM – FESEM |
| | نانوچندسازه‌ای زمینه پلیمری | آبکاری الکتریکی – افشانشی | AFM – FESEM |
| | نانوستونی متخلخل | آندایز الکتروشیمیایی | FESEM |
| | نانوستونی متراکم | PACVD – PVD - آبکاری الکتریکی | FESEM |
| | نانوستونی چندلایه‌ای | PACVD – PVD - آبکاری الکتریکی | FESEM |

## پیوست الف
## ( آگاهی دهنده)
## نحوه ارزیابی سختی با میکرو ویکرز

**الف- ۱** مطابق منابع موجود، لازم است میزان فرورفتگی متناسب با ضخامت پوشش تعیین شود. به‌دلیل ضخامت کم پوشش‌های نانومقیاس سخت، بهترین روش سنجش سختی آن‌ها، روش نانوتورفتگی با فرورونده برکوویچ[1] است. به‌دلیل گران بودن روش و عدم دسترسی سریع به این آزمون، روش دیگری برای سنجش سختی پیشنهاد می‌شود. برای این منظور از آزمون ریزسختی ویکرز استفاده می‌شود [10]. کافی است بعد از انجام این آزمون، با استفاده از روابط الف-۱ تا الف-۳ اثر سختی بستره را حذف و در نتیجه سختی واقعی پوشش (با تخمین بسیار مناسب) را گزارش کرد.

**الف-۲** درصورت استفاده از فرورونده میکرو، برای ارزیابی سختی پوشش سخت باید دو نکته را موردتوجه قرار داد:

**۱-** به حداقل نیروی اعمالی بسنده نمود.

**۲-** با توجه به اینکه عدد سختی به‌دست‌آمده، سختی ترکیب بستره و پوشش است، بنابراین باید اثر سختی پوشش را از عدد به‌دست‌آمده طبق روابط الف-۱ تا الف-۳ حذف کرد.

تاکنون چندین روش و قانون برای حذف اثر سختی بستره از سختی ترکیب بستره- پوشش ابداع شده است که همگی از یک قانون خطی مطابق رابطه الف-۱ پیروی می‌کنند [12] ,[11]. روابط حذف اثر سختی بستره از سختی ترکیب بستره-پوشش به‌صورت زیر است.

$$H_C = H_S + a(H_F - H_S) \qquad \text{الف-۱}$$

$$a = 2C\left(\frac{t}{d}\right) + C^2\left(\frac{t}{d}\right)^2 \qquad \text{الف-۲}$$

$$H_F = H_C + \frac{H_C - H_S}{2C\left(\frac{t}{d}\right) + C^2\left(\frac{t}{d}\right)^2} \qquad \text{الف-۳}$$

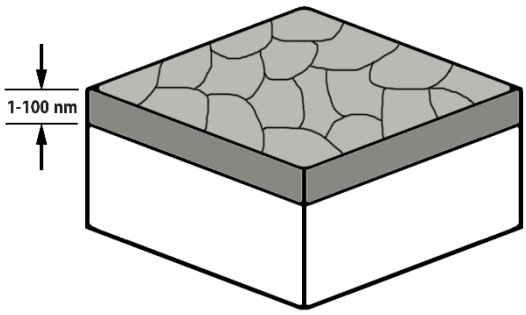
در این رابطه $H_S$، $H_F$ و $H_C$ به ترتیب سختی بستره، سختی پوشش و سختی ترکیبی بستره-پوشش است که از آزمون ماکروسختی بدست می‌آید. $a$ مربوط به سختی لایه است که تنها تفاوت میان مدل‌های مختلف، از مقدار عددی آن نشأت می‌گیرد. با این وجود روش جانسون- هوگمارک[2] که نسبتاً ساده‌تر و البته دقیق‌تر است در رابطه الف-۲ بیان می‌شود [13] که در آن t ضخامت پوشش، d قطر متوسط فرورفتگی و C ثابتی است که با زوایای هندسی فرورونده مقادیر ۰٫۱۴ یا ۰٫۰۷ است. در نهایت رابطه الف-۳ به‌دست می‌آید که به کمک آن می‌توان اثر سختی بستره را حذف و سختی واقعی پوشش را گزارش کرد.

1- Berkovich indenter
2- Jonsson

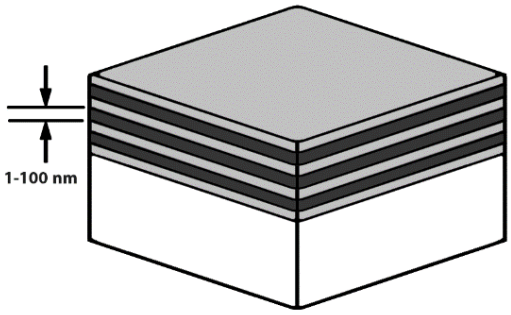
**یادآوری ۱**- به‌منظور محاسبه صحیح سختی پوشش، ضروری است که سختی بستره پس از فرایند پوشش‌دهی، افت قابل‌توجهی نداشته باشد. درصورت افت سختی، لازم است سختی فلز پایه مجدد اندازه‌گیری شود.

**یادآوری۲**- البته اگر ضخامت پوشش بیش از ۵ میکرومتر و نیروی فرورونده ویکرز کمتر از ۱۰ گرم باشد، عدد سختی به‌دست آمده بسیار نزدیک به عدد سختی واقعی پوشش نانومقیاس سخت خواهد بود.

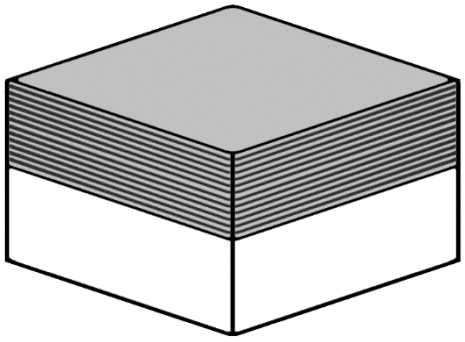
## پیوست ب
## ( آگاهی دهنده)
## تصاویر طرحواره‌ای انواع معماری ساختار پوشش‌ها



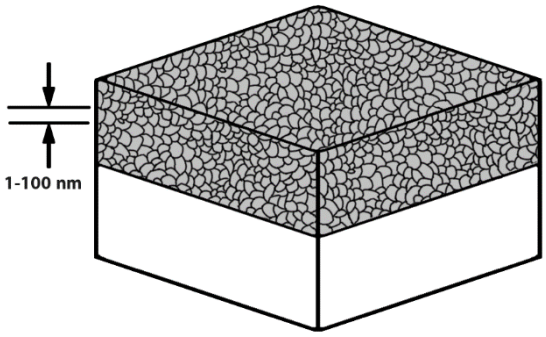

الف- نانوپوشش تک‌لایه‌ای



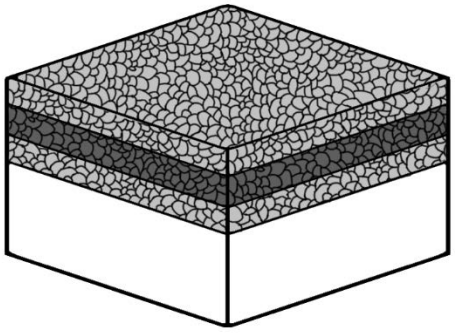

ب- نانوپوشش نانولایه‌ای



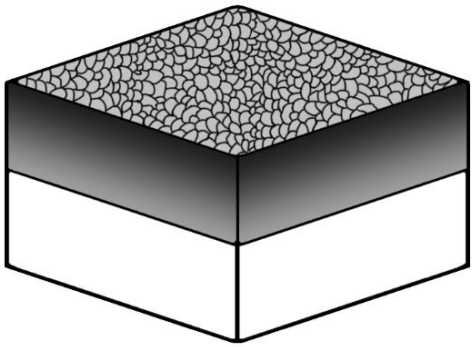
پ- نانوپوشش ابرشبکه‌ای



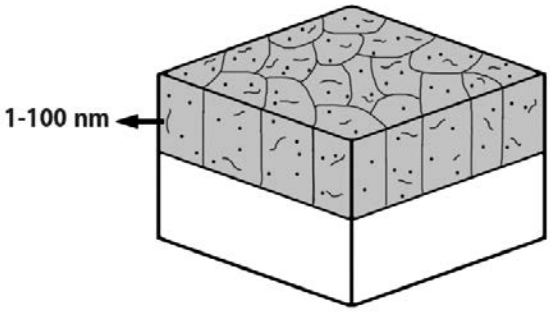

ت- نانوساختار نانودانه‌ای تک‌لایه‌ای



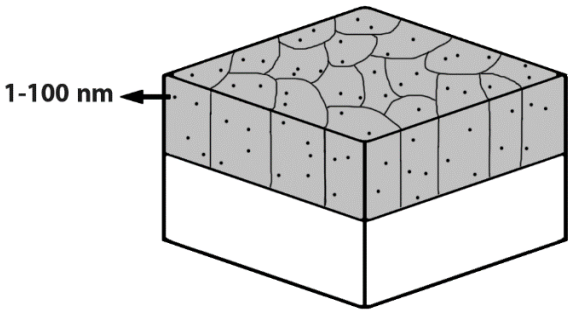
ث- نانوساختار نانودانه‌ای چندلایه‌ای



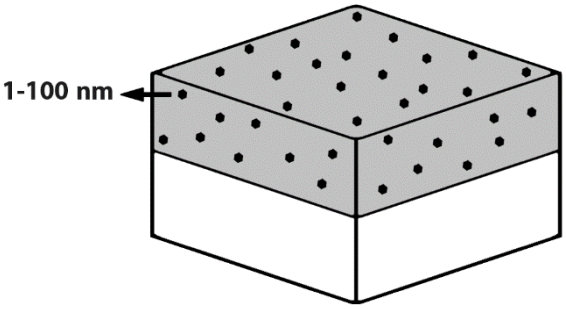
ج-نانوساختار نانودانه‌ای گرادیانی



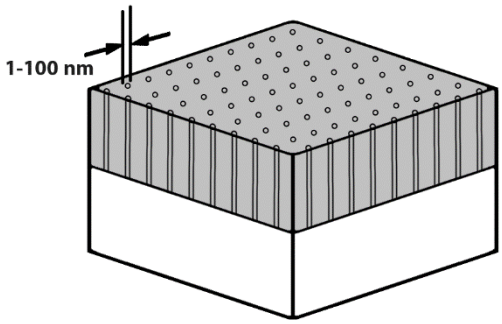

چ- نانوساختار نانوچندسازه‌ای زمینه فلزی



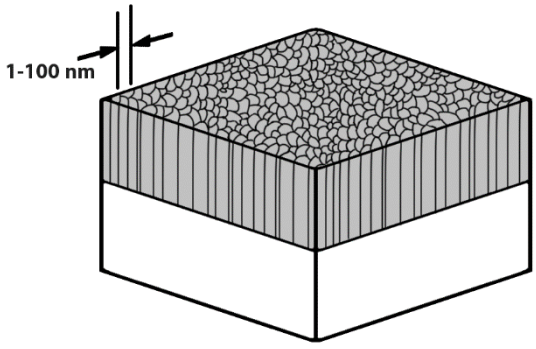

ح- نانوساختار نانوچندسازه‌ای زمینه سرامیکی



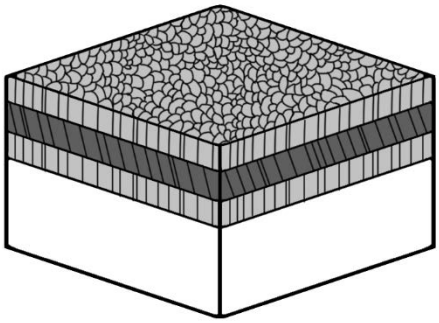

خ- نانوساختار نانوچندسازه‌ای زمینه پلیمری




د- نانوساختار نانوستونی متخلخل




ذ- نانوساختار نانوستونی متراکم



ر- نانوساختار نانوستونی چندلایه‌ای

## کتاب نامه


[1] V. F. C. Sousa and F. J. G. Silva, Recent advances in turning processes using coated tools—A comprehensive review, *Metals (Basel).*, vol. 10, no. 2, 2020, doi: 10.3390/met10020170.

[2] S. C. Tjong and H. Chen, Nanocrystalline materials and coatings, *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 45, no. 1–2, pp. 1–88, 2004, doi: 10.1016/j.mser.2004.07.001.

[3] Y. HUAN, K. WU, C. LI, H. LIAO, and C. D. M. ZHANG, Micro-nano structured functional coatings deposited by liquid plasma spraying, *J. Adv. Ceram.*, vol. 9, no. 5, pp. 517–534, 2020, doi: 10.1007/s40145-020-0402-9.

[4] M. Hala, Characterization of High Power Impulse Magnetron Sputtering Discharges, 2011.

[5] M. Aliofkhazraei, *Anti-Abrasive Nanocoatings Current and Future Applications*. 2014.

[۶] استاندارد ملی ایران شماره ۲۱۲۵۹: سال ۱۳۹۵، فناوری نانو- مشخصه‌یابی نانومواد با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) - روش آزمون

[۷] استاندارد ملی ایران شماره ۲-۲۱۹۵۰: سال ۱۳۹۶، فناوری نانو- مشخصه‌یابی نانومواد به وسیله میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)- قسمت ۲: روش آزمون

[۸] استاندارد ملی ایران شماره ۱۵۶۰۳: سال ۱۳۹۷، فناوری نانو- تعیین اندازه نانوذرات با استفاده از روش میکروسکوپی نیروی اتمی- راهنما

[۹] استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۲۷: سال ۱۳۸۸، پوشش‌های فلزی و اکسیدی- اندازه‌گیری ضخامت پوشش- روش میکروسکوپی

[10] ISO 6507-1:2018, Metallic materials- Vickers hardness test- part1: Test method.

[11] E. S. Puchi-Cabrera, A new model for the computation of the composite hardness of coated systems, *Surf. Coatings Technol.*, vol. 160, pp. 177–186, 2002.

[12] J. R. Tuck, A. M. Korsunsky, D. G. Bhat, and S. J. Bull, Indentation hardness evaluation of cathodic are deposited thin hard coatings, *Surface and Coatings Technology*, vol. 139, no. 1. pp. 63–74, 2001, doi: 10.1016/S0257-8972(00)01116-6.

[13] B. Jönsson and S. Hogmark, Hardness measurements of thin films, *Thin Solid Films*, vol. 114, no. 3. pp. 257–269, 1984, doi: 10.1016/0040-6090(84)90123-8.