



جمهوری اسلامی ایران  
Islamic Republic of Iran  
سازمان ملی استاندارد ایران

Iran National Standards Organization



استاندارد ملی ایران

۲۳۲۲۱

چاپ اول

۱۴۰۱



دارای محتوای رنگی

INSO  
23221  
1st Edition  
2023

فناوری نانو- پوشش‌های نانومقیاس سخت-  
ارزیابی مقاومت به سایش- ویژگی‌ها و  
روش‌های آزمون

**Nanotechnology- Hard nanoscale coatings-  
Assessment of wear resistance –  
Specifications and test methods**

ICS: 07.120

سازمان ملی استاندارد ایران

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

صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۶۱۳۹ تهران-ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۰۸۰ و ۸۸۸۸۷۱۰۳

کرج، شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۳۱۵۸۵-۱۶۳ کرج - ایران

تلفن: ۸-۳۱-۳۲۸۰۶۰۳۱ (۰۲۶)

دورنگار: ۸۱۱۴-۳۲۸۰۸۱۱۴ (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 روزرسانی 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 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.

تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری کند. سازمان می‌تواند به منظور حفظ بازارهای 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 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 - پوشش‌های نانومقیاس سخت - ارزیابی مقاومت به سایش - ویژگی‌ها و روش آزمون»

### رئیس:

رئیس و عضو هیئت مدیره - انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران

اشرفی‌زاده، سید فخرالدین  
(دکترای مهندسی مواد)

### دبیر:

عضو هیئت علمی - دانشگاه بوعلی سینا

علم‌خواه، حسن  
(دکترای فناوری نانو-نانومواد)

### اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

کارشناس - گروه استاندارد و ارزیابی محصولات ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

اسلامی‌پور، الهه  
(کارشناسی ارشد زیست‌شناسی سلولی مولکولی)

کارشناس تحقیق و توسعه - شرکت فناوران سخت آرا

افشار، زهرا  
(کارشناسی ارشد مهندسی مواد)

عضو هیئت علمی - دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

بخشی، سعیدرضا  
(دکترای مهندسی مواد)

عضو هیئت علمی - دانشگاه صنعتی شریف

دولتی، ابوالقاسم  
(دکترای مهندسی مواد-خوردگی)

مدیرعامل - شرکت تجهیز صنعت نصیر

شمس، احمد  
(کارشناسی ارشد مهندسی مواد)

رئیس هیئت مدیره - شرکت راصد توسعه فناوری‌های پیشرفته

سهرابی جهرمی، ابودر  
(دکترای نانوفناوری-نانومواد)

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

سیفی، مهوش  
(کارشناسی ارشد مدیریت دولتی)

کارشناس - گروه استاندارد و ارزیابی محصولات ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

گل‌زردی، سمیرا  
(کارشناسی ارشد مهندسی مواد-سرامیک)

مدیرعامل - شرکت نوین فن سنجش آویسا

منتظری، مانی  
(کارشناسی ارشد مهندسی مواد)

عضو هیئت علمی - دانشگاه بوعلی سینا

نوری، میثم  
(دکترای مهندسی مواد)

### ویراستار:

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

سیفی، مهوش  
(کارشناسی ارشد مدیریت دولتی)

## فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
و	پیش‌گفتار
ز	مقدمه
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۱	۲ مراجع الزامی
۲	۳ اصطلاحات و تعاریف
۴	۴ ویژگی‌ها
۴	۵ انواع روش‌های آزمون سایش
۴	۱-۵ کلیات
۱۰	۲-۵ ویژگی‌های مشترک روش‌های آزمون
۱۲	۳-۵ انتخاب روش آزمون و عوامل مؤثر بر آن
۱۴	۶ ارزیابی رفتار سایشی
۱۴	۱-۶ کلیات
۱۴	۲-۶ ضریب اصطکاک
۱۵	۳-۶ میزان سایش
۱۷	۷ گزارش آزمون
۱۸	پیوست الف (آگاهی‌دهنده) فرم پیشنهادی گزارش نتایج آزمون سایش
۱۹	کتابنامه

## پیش‌گفتار

استاندارد «فناوری نانو- پوشش‌های نانومقیاس سخت- ارزیابی مقاومت به سایش - ویژگی‌ها و روش‌های آزمون» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط تهیه و تدوین شده‌است، در یکصد و بیست و هفتمین اجلاس کمیته ملی استاندارد ایران مورخ ۱۴۰۱/۱۲/۱۶ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک ماده ۷ قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد، ابلاغ شده در دی ماه ۱۳۹۶، به‌عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران براساس 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 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 مآخذی که برای تهیه و تدوین این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است:

- ۱- استاندارد ملی ایران شماره ۱۸۰۸۶: سال ۱۳۹۳، فناوری نانو- راهنمای روش‌هایی برای اندازه‌گیری نانو و میکروتربیولوژی
- ۲- استاندارد ملی ایران شماره ۲۳۱۴۳: سال ۱۴۰۱، فناوری نانو- پوشش‌های نانومقیاس سخت- مشخصه‌یابی و روش‌های آزمون
- ۳- استاندارد ملی ایران شماره ۲۳۱۶۹: سال ۱۴۰۱، فناوری نانو- پوشش‌های نانومقیاس سخت- طبقه‌بندی براساس مشخصه‌های هندسی و سختی
- ۴- استاندارد ملی ایران شماره ۲۳۲۱۹: سال ۱۴۰۱، فناوری نانو- پوشش‌های نانومقیاس سخت- ارزیابی استحکام چسبندگی- ویژگی‌ها و روش‌های آزمون

## مقدمه

یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب و آسیب قطعات صنعتی، پدیده سایش است که باعث اتلاف ماده در سطح می‌شود. استفاده از پوشش‌های با سختی بالا می‌تواند موجب کاهش میزان سایش قطعات، کاهش هزینه‌های ناشی از تخریب و شکست، افزایش عمر کاری آن‌ها و بازدهی بیشتر فرایند شود. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های پوشش‌های مورد استفاده در کاربردهای تحت سایش، مقاومت به سایش بالای آن‌ها است. لذا وجود روش‌هایی برای ارزیابی مقاومت در برابر سایش پوشش‌ها، لازم و ضروری است تا صنعتگران بتوانند پوشش‌های سخت مورد نیاز خود را انتخاب کنند.

استاندارد حاضر، انواع روش‌های پرکاربرد ارزیابی خواص سایشی پوشش‌های نانومقیاس سخت اعم از مقدار ضریب اصطکاک و میزان مقاومت به سایش را ارائه می‌دهد. برای اطمینان از عملکرد مطلوب قطعات، لازم است تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان قطعات پوشش‌دار، رفتار سایشی پوشش را کنترل و ارزیابی کنند. بنابراین این استاندارد می‌تواند روش‌های مناسبی را برای ارزیابی میزان سایش (به‌عنوان شاخصه‌ای از دوام و عمر قطعه) پوشش‌های نانومقیاس سخت فراهم کند.

توجه شود که از جمله شروط لازم برای مقاومت در برابر سایش پوشش‌های نانومقیاس سخت و حفاظت از بستره<sup>۱</sup> در برابر عوامل ساینده، خواص مکانیکی مناسب و چسبندگی مطلوب پوشش به بستره است.

قابل توجه است که سنجش میزان مقاومت به سایش در هر نمونه، علاوه بر خواص ماده تحت سایش به دو عامل دیگر بستگی دارد. اول روش آزمون استفاده شده برای ارزیابی مقاومت به سایش، دوم شرایط آزمون مانند بار اعمالی، سرعت لغزش، مسافت لغزش، دمای کاری قطعه، جنس و هندسه ساینده، جنس ماده روان‌کار<sup>۲</sup> و شرایط محیط (سیال یا خشک). انتخاب این عوامل باید به‌دقت انجام شود تا نتایج قابل اطمینانی حاصل شود. استاندارد حاضر می‌تواند در انتخاب روش آزمون و عوامل مؤثر در آن مفید باشد.

---

1- Substrate  
2- Lubricant

## فناوری نانو - پوشش نانومقیاس سخت - ارزیابی مقاومت به سایش - ویژگی‌ها و روش‌های آزمون

### ۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، ارائه روش‌هایی برای ارزیابی پوشش‌های نانومقیاس سخت در برابر سایش و بیان ویژگی آن‌ها است. با توجه به اینکه مقاومت به سایش پوشش‌های سخت نقش مهمی در عملکرد آن‌ها دارد، این استاندارد راهنمایی برای انتخاب روش آزمون مناسب در کاربردهای تحت سایش است. این استاندارد روش‌های ارزیابی مقاومت به سایش پوشش‌های نانومقیاس سخت را ارائه می‌دهد که عدد سختی آن‌ها بیش از ۱۲ گیگا پاسکال (یا ۱۲۰۰ ویکرز) باشد.

### 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.

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

استفاده از مراجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است:

۱-۲ استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۶۵۶: سال ۱۳۹۶، سرامیک‌های ظریف (سرامیک‌های ظریف، سرامیک‌های پیشرفته، سرامیک‌های صنعتی پیشرفته) - تعیین مشخصات اصطکاک و سایش سرامیک‌های یک‌پارچه با روش توپی در دیسک - روش آزمون

- 2-2 ISO 21874: 2019, PVD multi-layer hard coatings — Composition, structure and properties
- 2-3 ASTM G 99-05: 2005, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus
- 2-4 ASTM G 133-05: 2010, Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear



### ۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد، اصطلاحات با تعاریف زیر به کار می‌رود. برای اطلاع از تعاریف و اصطلاحات مرتبط بیشتر به استاندارد ملی ایران شماره ۲-۶۷۸۲: سال ۱۳۹۶ مراجعه شود [۱].

۱-۳

#### نانومقیاس

##### nanoscale

گستره اندازه بین تقریباً ۱nm تا ۱۰۰nm است [۲].

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

۲-۳

#### پوشش نانومقیاس سخت

##### hard nanoscale coating

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

[منبع: زیربند ۳-۱-۱۳، استاندارد ملی ایران-ایزو ۲۳۱۶۹: سال ۱۴۰۱]

۳-۳

#### سایش

##### wear

آسیب واردشده به سطح جامد که عموماً شامل از بین رفتن مواد به صورت مستمر و ناشی از حرکت نسبی میان آن سطح و جسم مقابل یا مواد در حال تماس است.

[منبع: زیربند ۳-۱، استاندارد ملی ایران شماره ۱۸۰۸۶: سال ۱۳۹۳، تغییر یافته- «جسم مقابل» اضافه شده است]

۴-۳

#### مسافت لغزش

##### sliding distance

مسافتی که سایش در آن اتفاق می‌افتد.

۵-۳

#### میزان سایش ویژه

##### specific wear rate ( $W_s$ )

میزان حذف مواد طی سایش که به صورت خارج قسمت حجم سایش،  $V$ ، بر حاصل ضرب نیروی عمود ( $F_p$ ) در مسافت لغزش ( $L$ ) تعریف می شود.

$$W_s = \frac{V}{F_p \times L} \quad (1)$$

[منبع: زیربند ۳-۲، استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۶۵۶: سال ۱۳۹۶، تغییر یافته-کلمه «میزان» جایگزین کلمه «نرخ» شده است]

۶-۳

اصطکاک

### friction

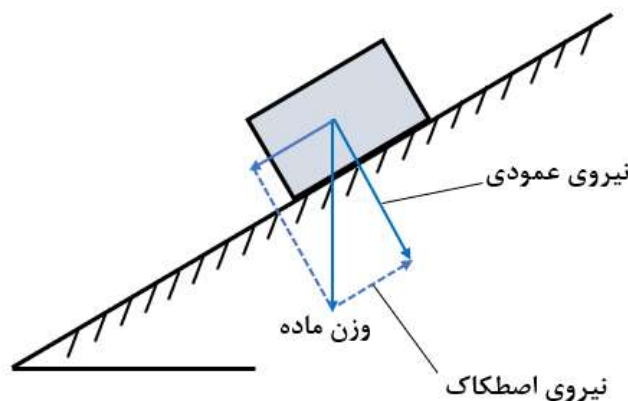
فرایند استهلاک انرژی و مقاومت در برابر حرکت نسبی است.

۷-۳

نیروی اصطکاک

### frictional force

تانژانت (جزء مماسی) نیروی مقاوم در فصل مشترک بین دو جسم، زمانی که یک جسم در اثر یک نیروی خارجی، حرکت می کند یا منجر به حرکت نسبی دیگری می شود.



شکل ۱- طرحواره نیروی اصطکاک [۱]

[منبع: زیربند ۳-۴، استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۶۵۶: سال ۱۳۹۶، تغییر یافته- «جزء مماسی» اضافه شده است]

۸-۳

ضریب اصطکاک

### coefficient of friction ( $\mu$ )

نسبت بدون بعد نیروی اصطکاک بین دو جسم،  $F_f$ ، به نیروی عمود اعمالی،  $F_p$ ، که دو جسم را به یکدیگر می فشارد.

$$\mu = \frac{F_f}{F_p} \quad (2)$$

[منبع: زیربند ۳-۵، استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۶۵۶: سال ۱۳۹۶]

#### ۴ ویژگی‌ها

در این استاندارد برای پوشش‌های نانومقیاس سخت با این ویژگی که میزان سختی پوشش بیش از ۱۲ گیگاپاسکال را داشته باشند، روش‌های ارزیابی مقاومت به سایش ارائه شده‌است. به بیان دیگر، این استاندارد برای ارزیابی مقاومت به سایش پوشش‌هایی به کار می‌رود که اولاً دارای یک جزء نانومقیاس باشند و در طبقه‌بندی پوشش‌های نانومقیاس مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۲۳۱۶۹: سال ۱۴۰۱ قرار گیرند و ثانیاً میزان سختی بیشتر از ۱۲ گیگاپاسکال داشته باشند. نوع آزمون، شرایط و پارامترهای آن و میزان مقاومت به سایش پوشش برحسب نیاز کارفرما و شرایط کاری نمونه تعیین می‌شود. لازم به ذکر است که آزمون‌های سایش تنوع بسیاری دارند که تمامی موارد در این استاندارد ذکر نشده‌است و ممکن است برحسب نیاز کارفرما و شرایط کاری نمونه، آزمون‌های دیگری نیز مورد استفاده قرار گیرد.

#### ۵ انواع روش‌های آزمون سایش

##### ۵-۱ کلیات

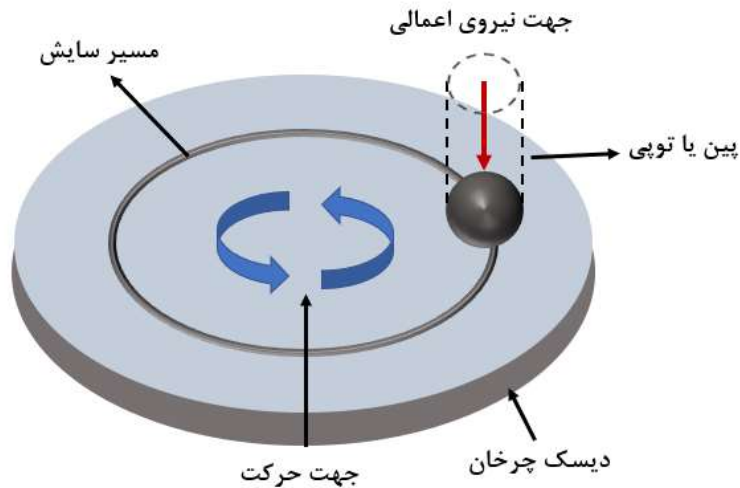
روش‌های بسیاری برای ارزیابی خواص سایشی پوشش‌های سخت وجود دارد که در این بخش پرکاربردترین روش‌ها معرفی خواهند شد. روش‌های ذکر شده ویژگی‌های مشترک بسیاری دارند که در ادامه معرفی خواهند شد.

##### ۵-۱-۱ سایش چرخوار

نشانه بارز این نوع آزمون سایش این است که مسیر لغزشی شیار سایش باقیمانده پس از اتمام آزمون، به صورت دایره‌ای روی سطح دیسک است. شکل ۲، طرحواره‌ای از این نوع آزمون را نشان می‌دهد. آزمون سایش چرخوار در دو نوع سایش پین روی دیسک<sup>۱</sup> و توپی روی دیسک<sup>۲</sup> انجام می‌شود.

---

1- Pin-on-disc  
2- Ball-on-disc



شکل ۲- طرحواره آزمون سایش چرخوار (برگرفته از استاندارد ASTM G99-05)

#### ۵-۱-۱-۱-۵ پین روی دیسک

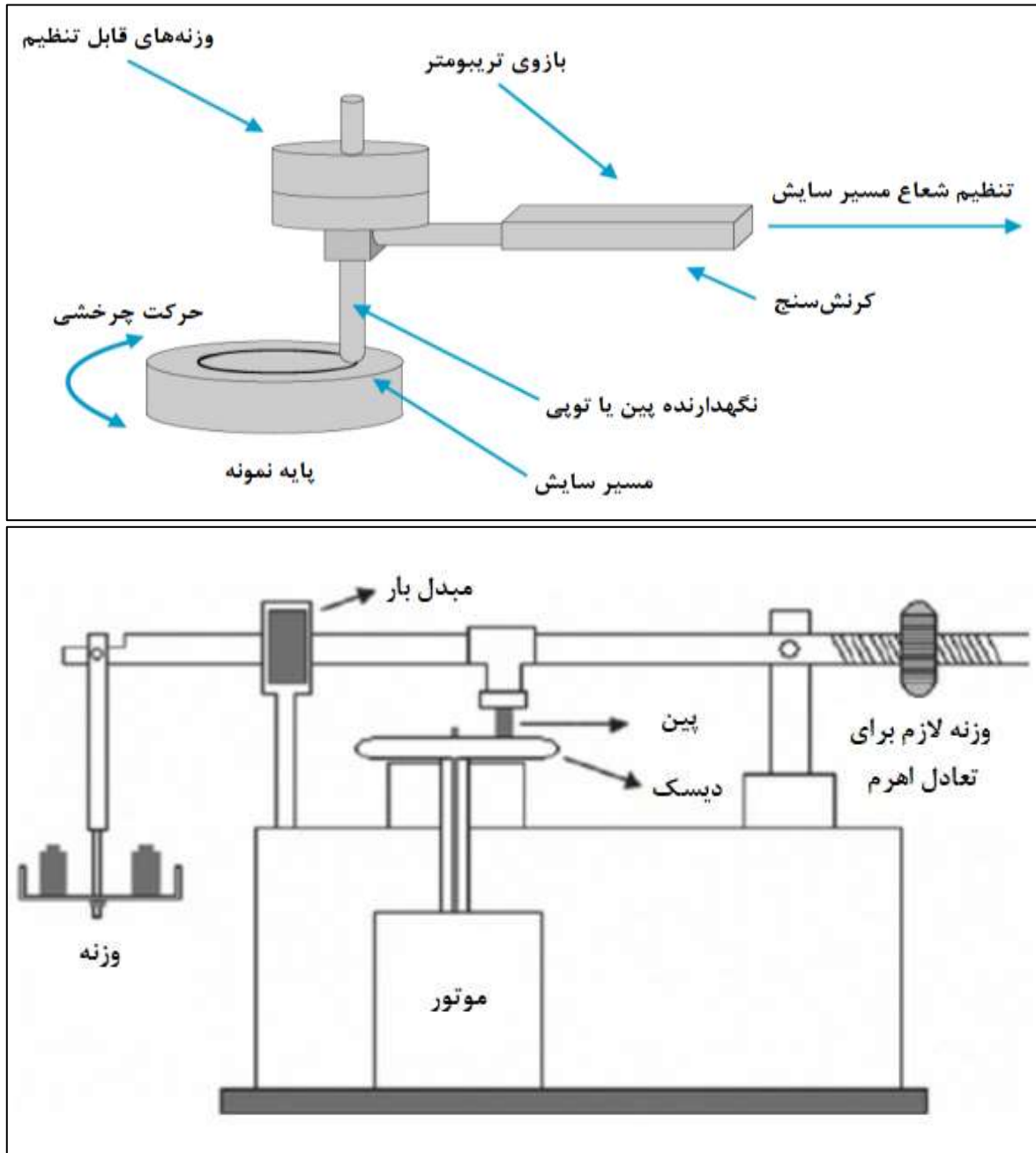
این روش براساس استاندارد ASTM G99-05 قابل انجام است. برای آزمون سایش پین روی دیسک، دو جزء مورد نیاز است: پین و دیسک پوشش دار. لازم است پین به صورت عمود روی یک دیسک یا سطح تخت قرار گیرد. یکی از دو جزء دیسک یا پین حول مرکز دیسک در حال چرخش است. پین با یک نیروی مشخص با استفاده از بازو یا اهرم و وزنه های مشخص، به دیسک اعمال می شود. روش های بارگذاری دیگری مانند هیدرولیک یا پنوماتیک نیز استفاده می شوند. نحوه بارگذاری بر نتایج سایش تأثیرگذار است.

#### ۵-۱-۱-۱-۵ تجهیزات لازم

برای اجرای آزمون سایش پین روی دیسک تجهیزاتی لازم است که در این بخش به آن ها اشاره شده است (به زیربند 5.1 استاندارد ASTM G99-05 مراجعه شود).

عموماً دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک شامل محور گردان<sup>۱</sup> و گیره<sup>۲</sup> برای نگه داشتن دیسک گردان است. بازوی اهرمی دستگاه برای نگه داشتن پین و متعلقاتی است که به پین اجازه می دهد تا با یک نیروی کنترل شده روی دیسک گردان قرار گیرد. نوع دیگری از سامانه آزمون، دیسک ثابت است و پین با یک نیروی ثابت روی دیسک می لغزد. در هر صورت مسیر سایش روی دیسک، دایره ای است که شامل شیارهای سایش در یک مسیر است. این سامانه ممکن است دارای ابزار اندازه گیری نیروی اصطکاک باشد، به عنوان مثال، یک مبدل بار<sup>۳</sup>، که امکان تعیین ضریب اصطکاک را فراهم می کند. شکل ۳ دو نمونه طرحواره دستگاه پین روی دیسک و اجزای آن را نشان می دهد.

1- Driven spindle  
2- Chuck  
3- Load cell



شکل ۳- دو نمونه طرحواره دستگاه پین روی دیسک و اجزای آن

#### ۵-۱-۱-۲ شرایط اجرای آزمون

برای اجرای آزمون پین روی دیسک سایش، شرایطی وجود دارد که در این زیربند ارائه شده است (به زیربند 6 استاندارد ASTM G99-05 مراجعه شود):

۱- این روش آزمون ممکن است برای انواع مختلفی از پوشش‌های سخت اعمال شود. شرط اصلی این است که نمونه دیسک پوشش‌دار کاملاً تخت باشد و نباید دارای شکستگی و خمیدگی باشد.

همچنین لازم است نمونه در برابر تنش‌های وارد شده در طول آزمون مقاومت کند (تغییر شکل ندهد) و براساس مشخصه‌های پوشش و بستره در گزارش آزمون توصیف شود.

۲- معمولاً پین به شکل استوانه‌ای یا کروی است. قطر پین استوانه‌ای یا کروی متداول بین ۲ میلی‌متر تا ۱۰ میلی‌متر است. قطر نمونه دیسک متداول بین ۳۰ میلی‌متر تا ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت نمونه دیسک در محدوده ۲ میلی‌متر تا ۱۰ میلی‌متر است. اگر در کاربرد صنعتی، ضخامت قطعه اصلی کمتر از ۲ میلی‌متر باشد، استفاده از نمونه دیسک با ضخامت کمتر از ۲ میلی‌متر مجاز است، مشروط بر اینکه تغییر شکل اتفاق نیافتد.

۳- سطوح ناهموار، اندازه‌گیری شیار سایش را دشوار می‌کند. زبری متوسط سطح ( $R_a$ ) نمونه کمتر از ۰٫۱ میکرومتر توصیه می‌شود (زیربند ۵-۳ استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۶۵۶: سال ۱۳۹۶).

۴- در آماده‌سازی سطح باید دقت شود تا از آسیب‌های زیرسطحی که ماده را به‌طور قابل‌توجهی تغییر می‌دهد جلوگیری شود (زیربند 6.3.1 استاندارد ASTM G99-05). به‌عنوان مثال، در پوشش نانومقیاس سخت اعمال‌شده به روش PVD، مجموعه‌ای از قطرک‌ها، حفره‌ها<sup>۱</sup> و کندگی‌ها<sup>۲</sup> در سطح پوشش ایجاد می‌شود. برای اینکه پوشش عملکرد مناسبی در برابر آزمون سایش داشته باشد، باید میزان سطح عیوب ذکرشده کمتر از ۱۰ درصد کل سطح باشد. بنابراین لازم است فرآیند آماده‌سازی نهایی سطح یا پولیش آن‌ها به قدری ادامه پیدا کند تا این میزان به کمتر از ۱۰ درصد برسد (زیربند ۴-۲-۴ استاندارد ملی ایران شماره ۲۳۱۴۳: سال ۱۴۰۱). همچنین نوع سطح و آماده‌سازی آن باید در گزارش آزمون ذکر شود.

#### ۵-۱-۱-۲-تویی روی دیسک

این روش آزمون براساس استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۶۵۶: سال ۱۳۹۶ قابل‌انجام است. در این روش، تماس لغزشی، با فشار تویی روی نمونه دیسک در حال چرخش، تحت یک نیروی ثابت انجام می‌شود.

#### ۵-۱-۱-۲-۱-تجهیزات لازم

برای اجرای آزمون سایش تویی روی دیسک، تجهیزاتی لازم است که در این بخش به آن‌ها اشاره شده‌است (به زیربند ۵-۲ و ۵-۳ استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۶۵۶: سال ۱۳۹۶ مراجعه شود).

برای اجرای این آزمون، تویی و نمونه دیسک پوشش‌دار لازم است. تویی باید به‌طور کامل کروی با قطر بیش از ۵ میلی‌متر باشد یا به شکل یک میله دارای راس کروی ماشین‌کاری‌شده در قسمت انتهایی باشد. قطر توصیه‌شده برای راس کروی میله، ۱۰ میلی‌متر است.

---

1- Droplet  
2- Pinhole  
3- Shallow crater

مشابه آزمون پین روی دیسک، ضخامت نمونه دیسک پوشش دار باید بیش از ۳ میلی‌متر بوده و به اندازه کافی بزرگ باشد که امکان جای دادن شیار سایش با قطر بیش از ۳۰ میلی‌متر را در خود داشته باشد. شکل ۲، طرحواره‌ای از روش توپیی روی دیسک را نشان می‌دهد.

یادآوری - برای نمونه‌های با سطح کوچک، قطر شیار سایش می‌تواند کمتر از محدوده ذکر شده باشد. برای اطلاعات بیشتر می‌توان به استاندارد ISO 21874:2019 مراجعه کرد.

#### ۵-۱-۱-۲ شرایط اجرای آزمون

برای اجرای آزمون سایش توپیی روی دیسک، شرایطی وجود دارد که در این بخش ارائه شده‌است (به زیربند ۷-۵ استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۶۵۶: سال ۱۳۹۶ مراجعه شود).

شرایط آزمون توصیه شده مطابق استاندارد ذکر شده در زیر ارائه شده‌است اما می‌توان برای تامین الزامات ویژه فرآیند اندازه‌گیری، تغییر داده شود. تمام شرایط آزمون باید در فرم گزارش آزمون (پیوست الف) قید شود.

۱- سرعت لغزش به میزان ۰٫۱ متر بر ثانیه، توصیه می‌شود. قطر شیار سایش بیش از ۳۰ میلی‌متر باشد و سرعت چرخش نگهدارنده دیسک از رابطه ۳ تعیین شود:

$$v_r = \frac{v}{\pi r} \quad (3)$$

که در آن:

$v_r$  سرعت چرخش بر حسب چرخش در هر ثانیه ( $s^{-1}$ );

$v$  سرعت لغزش بر حسب متر بر ثانیه (m/s);

$R$  شعاع شیار سایش بر حسب متر (m).

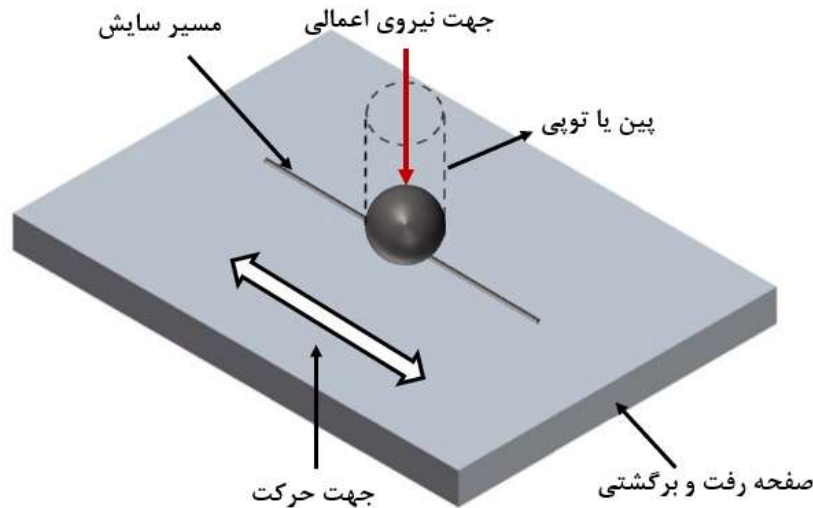
۲- انجام آزمون در اتمسفر هوا و در دمای محیط توصیه می‌شود. دمای محیط حداکثر می‌تواند تا دو درجه سلسیوس نوسان داشته باشد و دامنه تغییرات رطوبت نسبی حداکثر تا ۱۰ درصد کنترل شود.

#### ۵-۱-۲ سایش رفت و برگشتی

نشانه بارز این نوع آزمون سایش آن است که توپیی/پین و صفحه، حرکت لغزشی خطی رفت و برگشتی نسبت به هم دارند. شکل ۴ نمونه طرحواره‌ای از آزمون سایش رفت و برگشتی را نشان می‌دهد. آزمون سایش رفت و برگشتی در دو نوع سایش توپیی روی صفحه<sup>۱</sup> و پین روی صفحه<sup>۲</sup> انجام می‌شود.

1- Ball-on-flat

2- Pin-on-flat



شکل ۴- نمونه‌ای از طرحواره روش آزمون سایش رفت و برگشتی [3].

#### ۵-۱-۲-۱-۵ تویی روی صفحه

این روش براساس استاندارد ASTM G133-05 قابل انجام است. این روش شامل دو جزء است: یک صفحه مسطح پوشش‌دار و یک تویی که روی صفحه مسطح پوشش‌دار می‌لغزد (تویی هم‌چنین می‌تواند میله‌ای با یک نوک کرومی باشد) و صفحه مسطح و تویی، نسبت به یکدیگر در یک حرکت لغزشی خطی، عقب و جلو، تحت مجموعه‌ای از شرایط تعیین شده، حرکت می‌کنند. در این روش، نیرو به صورت عمودی به سمت پایین از طریق تویی روی صفحه مسطح اعمال می‌شود.

#### ۵-۱-۲-۱-۵ شرایط اجرای آزمون

برای اجرای آزمون سایش تویی روی صفحه، شرایطی وجود دارد که در این زیربند ارائه شده است (به زیربند 4 استاندارد ASTM G133-05 مراجعه شود):

۱- از آنجایی که این روش آزمون شامل حرکت رفت و برگشتی است و در آن تغییرات در سرعت لغزش و جهت حرکت در طول آزمون رخ می‌دهد، بنابراین شرایط سرعت ثابت حفظ نمی‌شود. نحوه تغییر سرعت با زمان با طراحی سازوکاری که تویی یا صفحه مسطح را به جلو و عقب می‌راند تعیین می‌شود.

۲- برای محاسبه حجم و میزان سایش، تغییرات ابعادی صفحه مسطح در نظر گرفته می‌شود.

۳- نیروی اصطکاک در طول آزمون اندازه‌گیری می‌شود و ممکن است برای ارزیابی تغییرات در شرایط تماس یا ضریب اصطکاک جنبشی به عنوان تابعی از زمان استفاده شود.

۴- طول مسیر سایش در آزمون رفت و برگشتی، نباید کمتر از ۱۰ میلی‌متر باشد.



## ۵-۲-۱-۲ بین روی صفحه

در آزمون بین روی صفحه، بین نسبت به یک صفحه مسطح پوشش‌دار ثابت در یک حرکت رفت‌وبرگشتی حرکت می‌کند [4]. شرایط آزمون مشابه آزمون توپیی روی صفحه است و تفاوت اصلی آن در شکل هندسی بین است.

## ۵-۲-۱ ویژگی‌های مشترک روش‌های آزمون

### ۵-۲-۱-۱ اجزای مشترک دستگاه‌های اجرای آزمون‌ها

برای اجرای آزمون‌های سایش دستگاه‌هایی استفاده می‌شوند که وجه اشتراکی دارند و معمولاً این دستگاه‌های آزمون سایش که با هر یک از روش‌های ذکر شده، آزمون را انجام می‌دهند، به‌طور مشترک باید به متعلقاتی مجهز باشند که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از (به زیربند 5 استاندارد ASTM G99-05 مراجعه شود):

۱- موتور محرکه: یک موتور با سرعت متغیر که قادر به حفظ سرعت ثابت اصلی تحت نیروی موردنیاز است. موتور به‌گونه‌ای نصب شود که لرزش یا ارتعاش آن بر آزمون تأثیری نداشته باشد.

۲- شمارنده: دستگاه باید مجهز به یک شمارنده باشد که دور یا تعداد رفت‌وبرگشت را ثبت کند و ترجیحاً قابلیت خاموش کردن دستگاه پس از تعداد دور و/یا رفت‌وبرگشت از پیش انتخاب‌شده، به وسیله شمارنده وجود داشته باشد.

۳- نگهدارنده بین و/یا توپیی و بازوی اهرمی: در یک دستگاه معمولی، نگهدارنده بین ثابت به بازوی اهرم (که یک محور است)، وصل می‌شود. برای اعمال نیروی مدنظر آزمون، از وزنه‌هایی با جرم مشخص استفاده می‌شود. در حالت ایده‌آل، محور بازو باید در صفحه تماس تحت سایش، به‌گونه‌ای قرار گیرد تا از نیروهای بارگذاری اضافی جلوگیری شود. نگهدارنده بین و/یا توپیی و بازو باید طراحی دقیقی داشته باشند تا حرکت‌های ارتعاشی در طول آزمون کاهش یابد.

۴- نگهدارنده نمونه دیسک یا صفحه پوشش‌دار: لازم است نمونه دیسک با گیره مخصوصی به دستگاه متصل شود تا هیچ‌گونه حرکت ارتعاشی در حین آزمون ایجاد نشود.

۵- ابزارهای اندازه‌گیری: برای به‌دست آوردن اندازه‌گیری‌های خطی پروفایل سایش (عمق سایش)، باید ابزارهای مورد استفاده، حساسیت ۲/۵ میکرومتر یا بالاتر، داشته باشند. ترازویی که برای اندازه‌گیری تغییر (کاهش یا افزایش) جرم نمونه آزمون استفاده می‌شود، باید حساسیت ۰/۱ میلی‌گرم یا بالاتر داشته باشد.

## ۵-۲-۲ شرایط مشترک روش آماده‌سازی و اجرای آزمون

برای اجرای آزمون‌های سایش، روش‌های آماده‌سازی و اجرای آزمون مشترکی وجود دارد که به شرح زیر بیان می‌شوند (به زیربند 8 استاندارد ASTM G99-05 مراجعه شود):

۱- لازم است قبل از آزمون و نیز قبل از اندازه‌گیری یا توزین، نمونه‌های دیسک تمیز و خشک شوند. باید دقت شود که سطح نمونه‌ها از هرگونه آلودگی، چربی یا مواد خارجی عاری شود. در این خصوص از پاک‌کننده‌ها و حلال‌های بدون کلر استفاده شود. در صورتی که نمونه‌های بر پایه آهن (فرومگناطیس)، دارای مغناطیس باقیمانده باشند، لازم است وامگناطیده<sup>۱</sup> شوند. روش‌های مورد استفاده برای آماده‌سازی در گزارش نتایج آزمون (پیوست الف) اشاره شود.

۲- ابعاد نمونه‌ها با دقت نزدیک به ۲/۵ میکرومتر اندازه‌گیری شود یا نمونه‌ها با دقت ۰/۱ میلی‌گرم وزن شود.

۳- نمونه با ایمنی بالا در دستگاه نگهدارنده قرار گیرد و به صورت عمود بر محور چرخش ثابت شود. همچنین پین با ایمنی بالا در نگهدارنده آن قرار گیرد و باید طوری تنظیم شود که پین هنگام تماس، عمود بر سطح نمونه دیسک باشد.

۴- جرم مناسب، برای تعادل اهرم دستگاه در نظر گرفته شود تا نیروی انتخاب‌شده به وسیله وزنه، دقیقاً به وسیله پین به نمونه آزمون اعمال شود.

۵- ابتدا میزان نیروی اعمالی به پین تنظیم شود و سپس موتور راه‌اندازی شده و به سرعت مناسب رسانده شود. به‌طور همزمان، شمارنده دور و/یا حرکت رفت و برگشت، فعال شود.

۶- نمونه‌ها از دستگاه برداشته شود و هرگونه مواد باقیمانده سایش به آرامی با استفاده از یک قلم‌مو تمیز شود. به تغییرات روی شیار سایش یا اطراف آن مانند برآمدگی<sup>۲</sup>، فلز جابه‌جا شده<sup>۳</sup>، تغییر رنگ، ریزترک یا لکه‌ها<sup>۴</sup> توجه شود (زیربند 8.9 استاندارد ASTM G99-05). لازم است قبل از توزین نمونه‌ها، برای تحلیل‌های بیشتر، باقیمانده‌های مواد سایش به دقت جمع‌آوری شود (به زیربند ۷-۷ استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۶۵۶: سال ۱۳۹۶ مراجعه شود).

یادآوری- از قلم‌مو به‌گونه‌ای استفاده شود که تأثیری در مسیر سایش نداشته باشد.

۷- ابعاد شیار سایش (عرض و عمق) نمونه با دقت ۲/۵ میکرومتر اندازه‌گیری شود یا نمونه با دقت ۰/۱ میلی‌گرم وزن شود.

---

1- Demagnetized  
2- Protrusions  
3- Displaced metal  
4- Spotting

۸- آزمون با نمونه‌های یکسان تکرار شود تا داده‌های کافی برای نتایج آماری معنی‌دار حاصل شود (حداقل سه بار تحت شرایط آزمون یکسان (به زیربند ۷-۱۰ استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۶۵۶: سال ۱۳۹۶ مراجعه شود).

۹- در صورت نیاز به ادامه آزمون سایش، نمونه باید در جایگاه و محل قبلی خود قرار گیرد تا مسیر سایش دچار خدشه نشود.

### ۳-۵ انتخاب روش آزمون و عوامل مؤثر بر آن

روش آزمون و عوامل مؤثر بر آن با توجه به شرایط نمونه و شرایط کاری آن انتخاب می‌شود. عوامل بسیاری بر ارزیابی مقاومت به سایش پوشش‌های نانومقیاس سخت تأثیرگذار است. بنابراین پارامترهای آزمون باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که نتایج حاصل از آزمون قابل اطمینان باشد. شکل ۵ برخی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر آزمون سایش را نشان می‌دهد.



شکل ۵- عوامل مؤثر در آزمون سایش براساس استاندارد ASTM G99-05

در آزمون سایش، معمولاً با انجام آزمون در یک مسافت لغزشی انتخاب‌شده و سپس مقادیر انتخابی نیرو و سرعت، شرایط بهینه آزمون به‌دست می‌آید و سایر شرایط آزمون نیز بسته به هدف آزمون انتخاب می‌شوند. برای نمونه برخی نکات مهم در انتخاب روش و شرایط آزمون در این زیربند بیان می‌شوند (به زیربند 5.5.2 استاندارد ISO 21874:2019 مراجعه شود):

۱- یکی از معیارهای مهم در انتخاب روش آزمون، ابعاد نمونه است. برای مثال روش‌های رفت‌وبرگشتی برای ارزیابی رفتار سایشی نمونه‌های با ابعاد کوچک مناسب است.

۲- انتخاب روش آزمون براساس نوع کاربرد نمونه‌های پوشش‌دار انتخاب می‌شود. برای مثال در مورد نمونه حلقه پیستون پوشش‌دار که تحت شرایط کاری رفت‌و برگشتی است آزمون سایش رفت‌و برگشتی مناسب است در حالیکه در چرخ‌دنده پوشش‌دار، آزمون سایش چرخوار توصیه می‌شود.

۳- انتخاب پین یا توپی سایشی باید به‌گونه‌ای باشد که سختی لازم برای ایجاد مسیر سایشی بر نمونه را داشته باشد. البته توصیه می‌شود در صورت امکان نسبت سختی نمونه دیسک پوشش‌دار به پین و/یا توپی، بین ۰٫۶ تا ۰٫۷ باشد [۵].

۴- نیروی اعمالی باید متناسب با ضخامت و سختی پوشش انتخاب شود. اگر نیروی اعمالی کم باشد باعث می‌شود سایش قابل توجهی اتفاق نیافتد و اگر نیرو زیاد باشد ممکن است در همان لحظات ابتدای آزمون، پوشش را تخریب کند. بنابراین میزان نیرو باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که پوشش به مرور زمان تحت سایش قرار گیرد. معمولاً برای تعیین نیروی اعمالی مناسب، آزمون بارپذیری انجام می‌شود. به این صورت که ابتدا روی نمونه دیسک، آزمون سایش در چندین نیروی متفاوت انجام می‌شود. نیروی نهایی مناسب برای انجام آزمون سایش، کمتر از حداقل نیروی است که موجب تخریب پوشش می‌شود. برای مثال در پوشش‌های سخت چندلایه PVD، بار اعمالی انتخابی برحسب ضخامت پوشش و سختی پوشش در جدول ۱ آمده است:

جدول ۱- میزان بار اعمالی انتخابی در پوشش‌های سخت چندلایه PVD برحسب ضخامت و سختی پوشش (مطابق زیربند ۴-۳-۴ استاندارد ملی ایران شماره ۲۳۱۴۳: سال ۱۴۰۱)

بار اعمالی انتخابی	محدوده ضخامت و سختی پوشش
۱ نیوتن	ضخامت پوشش کمتر از ۲ میکرومتر یا سختی پوشش کمتر از ۱۸۰۰ ویکرز
۵ نیوتن	ضخامت پوشش ۲ میکرومتر تا ۵ میکرومتر یا سختی پوشش بین ۱۸۰۰ ویکرز تا ۲۸۰۰ ویکرز
۱۰ نیوتن	ضخامت پوشش بیش از ۵ میکرومتر یا سختی پوشش بیش از ۲۸۰۰ ویکرز

۵- از جمله عوامل مهم انتخاب روش آزمون، سرعت و مسافت لغزش مناسب است. برای مثال در پوشش‌های سخت چندلایه PVD، سرعت لغزش ۰٫۱ متر بر ثانیه و مسافت لغزش در محدوده ۱۸۰ متر تا ۷۲۰ متر توصیه می‌شود (مطابق زیربند 5.5.2 استاندارد ISO 21874:2019).

## ۶ ارزیابی رفتار سایشی

## ۱-۶ کلیات

طبق زیربند 3 استاندارد ASTM G99-05، نتایج آزمون سایش به صورت‌های مختلفی بررسی می‌شود. میزان سایش با توزین نمونه پوشش‌دار قبل و بعد از آزمون و/یا با اندازه‌گیری پروفایل شیار حاصل از سایش بعد از آزمون تعیین می‌شود. اگر از پروفایل سایش استفاده شود، عمق یا تغییر شکل مسیر سایش نمونه دیسک و/یا صفحه (برحسب میلی‌متر) با یکی از روش‌های اندازه‌گیری مناسب مانند اندازه‌گیر فاصله الکترونیکی یا پروفایل سوزنی<sup>۱</sup> تعیین می‌شود. اندازه‌گیری‌های پروفایل سایش با استفاده از روابط هندسی مناسب، به حجم سایش (برحسب میلی‌متر مکعب) تبدیل می‌شود. از آنجا که در اندازه‌گیری‌های دقیق، معمولاً میزان کاهش جرم بسیار کوچک است، لذا غالباً از اندازه‌گیری‌های پروفایل سایش استفاده می‌شود. در صورتی که چگالی پوشش مشخص باشد، می‌توان میزان کاهش جرم نمونه را به کاهش حجم (برحسب میلی‌متر مکعب) تبدیل کرد.

نتایج سایش ممکن است در برخی موارد به صورت نمودارهای تغییرات حجم سایش یا تغییرات جرم برحسب مسافت لغزش گزارش شود.

## ۲-۶ ضریب اصطکاک

ضریب اصطکاک مطابق زیربند ۸-۳ استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۶۵۶: سال ۱۳۹۶ قابل محاسبه است. یکی از نتایج مهم حاصل از آزمون سایش، محاسبه میانگین ضریب اصطکاک است. مقدار عددی میانگین ضریب اصطکاک با استفاده از رابطه ۴ با توجه به نیروی عمودی اعمالی و میانگین مقدار نیروی اصطکاک محاسبه می‌شود:

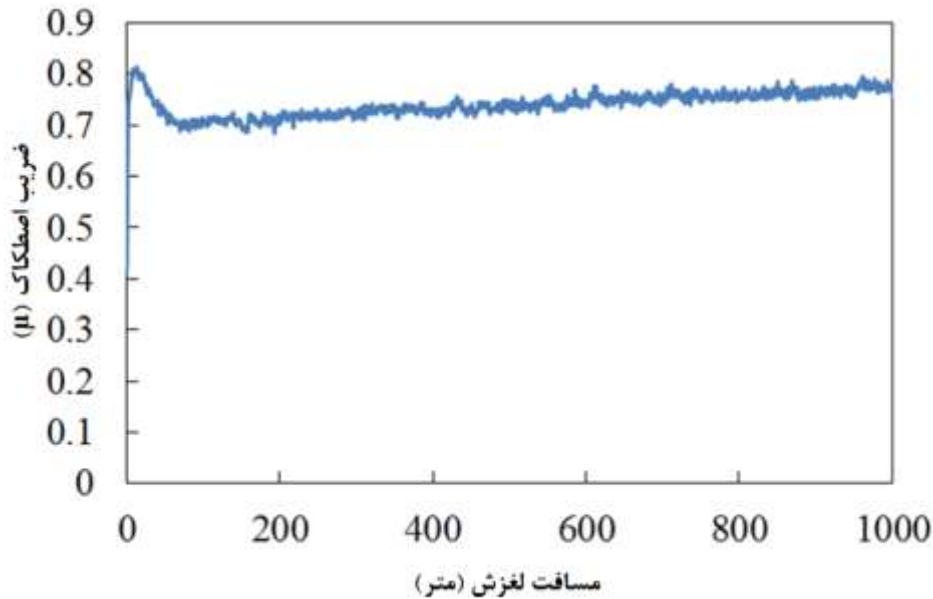
$$\mu = \frac{\bar{F}_f}{F_p} \quad (4)$$

که در آن:

$\mu$  میانگین ضریب اصطکاک، ضریب اصطکاک ( $\mu$ )  
 $\bar{F}_f$  مقدار میانگین نیروی اصطکاک برحسب نیوتن (N)؛  
 $F_p$  نیروی عمودی اعمالی برحسب نیوتن (N).

به علت تغییر ضریب اصطکاک با مسافت لغزش، مقادیر اولیه، حالت پایدار، بیشینه و کمینه آن، در صورت دسترسی باید تعیین و گزارش شود.

نمونه‌ای از نمودار ضریب اصطکاک برحسب مسافت لغزش به دست آمده از آزمون سایش در شکل ۶ ارائه شده است. در این حالت، می‌توان میانگین ضریب اصطکاک را در یک بازه‌ای از مسافت لغزش تعیین نمود.



شکل ۶- نمونه‌ای از نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش به دست آمده از آزمون سایش [6]

### ۳-۶ میزان سایش<sup>۱</sup>

میزان سایش مطابق زیربند ۸-۲ استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۶۵۶: سال ۱۳۹۶ قابل محاسبه است. میزان سایش ویژه برای پین و/یا توپی و نمونه دیسک و/یا صفحه به طور جداگانه گزارش می‌شود. در این استاندارد روش محاسبه میزان سایش ویژه نمونه دیسک ارائه شده است. برای اطلاع از نحوه محاسبه «میزان سایش ویژه پین» به استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۶۵۶: سال ۱۳۹۶ مراجعه شود. «میزان سایش ویژه نمونه دیسک» به دو روش مختلف زیر قابل محاسبه است:

### ۱-۳-۶ میزان سایش ویژه بر حسب حجم سایش

حجم سایش نمونه دیسک با استفاده از رابطه ۵ به کمک مساحت سطح مقطع شیار سایش اندازه‌گیری شده محاسبه می‌شود:

$$V = \frac{\pi \times R (S_1 + S_r + S_p + S_f)}{2} \quad (5)$$

که در آن:

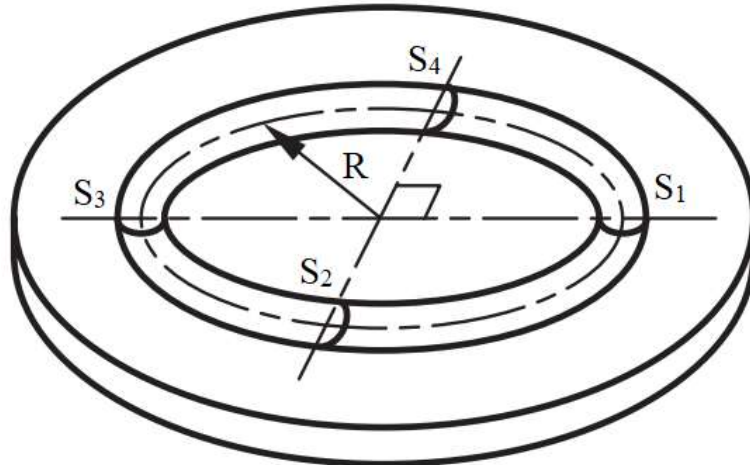
V حجم از دست رفته در دیسک بر حسب متر مکعب ( $m^3$ );

R شعاع مسیر سایش بر حسب متر (m);

$S_1$  تا  $S_f$  مساحت سطح مقطع در چهار نقطه از دایره شیار سایش بر حسب متر مربع ( $m^2$ ). (مطابق شکل ۷)

اگر نسبت مساحت سطح مقطع بیشینه به کمینه بیش از ۱/۵ باشد، لازم است آزمون تکرار شود.

1- Wear rate



شکل ۷- طرحواره موقعیت چهار نقطه  $S_1$  تا  $S_4$  در نمونه دیسک ساییده شده برای محاسبه میزان سایش [7]

به طور عملی برای به دست آوردن حجم سایش، می توان پروفایل شیار سایش را اندازه گیری کرد و سپس مساحت از دست رفته در پروفایل را به دست آورد و مقدار آن را در  $R$  ضرب کرد تا حجم سایش محاسبه شود. سپس مقدار حجم سایش در رابطه ۶ جاگذاری شود. در مواردی که امکان محاسبه حجم از دست رفته دیسک با استفاده از دستگاه (برای نمونه بعضی پروفایل سنج ها)، وجود دارد استفاده از رابطه ۵ نیاز نیست و حجم گزارش شده توسط دستگاه، به طور مستقیم در رابطه ۶ جاگذاری شده و میزان سایش ویژه محاسبه می شود.

برای تعیین میزان سایش ویژه لازم است مقدار عددی حجم سایش به دست آمده از رابطه ۵ را در رابطه ۶ قرار داد:

$$W_s = \frac{V}{F_p \times L} \quad (6)$$

که در آن:

$V$  حجم از دست رفته در دیسک بر حسب متر مکعب ( $m^3$ );

$W_s$  میزان سایش ویژه نمونه دیسک بر حسب ( $m^3/N$ ) یا ( $mm^3/N.m$ );

$F_p$  نیروی عمودی اعمالی بر حسب نیوتن ( $N$ );

$L$  مسافت لغزش بر حسب متر ( $m$ ).

### ۶-۳-۲ میزان سایش ویژه بر حسب کاهش جرم

میزان سایش ویژه با استفاده از رابطه ۷ از تفاضل بین جرم نمونه دیسک قبل و بعد از آزمون سایش، محاسبه می شود:

$$W_s = \frac{m_b - m_a}{F_p \times L} \quad (7)$$

که در آن:

$W_s$  میزان سایش ویژه نمونه دیسک بر حسب ( $mg/N.m$ );

$m_b$  جرم نمونه دیسک قبل از آزمون سایش برحسب میلی گرم (mg)؛

$m_a$  جرم نمونه دیسک بعد از آزمون سایش برحسب میلی گرم (mg).

اگر کاهش جرم در مقایسه با جرم کلی بسیار کم باشد یا قابل تشخیص نباشد،  
 $(m_b - m_a)/m_b < 0.001/0$ ، میزان سایش ویژه نباید برحسب کاهش جرم تعیین شود.

**یادآوری** - در صورتی استفاده از روابط فوق صحیح است که اطمینان حاصل شود فرآیند سایش، در تمام مدت آزمون، در داخل پوشش اتفاق می افتد و وارد بستره نشده است.

## ۷ گزارش آزمون

گزارش ارزیابی مقاومت به سایش پوشش‌های نانومقیاس سخت به صورت زیر تدوین می شود.

- ۱- نام آزمون کننده و نام و نشانی آزمایشگاه؛
  - ۲- نام و نشانی مشتری یا متقاضی؛
  - ۳- ارجاع به استاندارد مورد استفاده؛
  - ۴- مشخصات پوشش نانومقیاس مورد آزمون و ضخامت آن (برحسب نانومتر یا میکرومتر)؛
  - ۵- جزئیات نمونه دیسک و/یا صفحه (مانند ابعاد، زبری سطح، جنس و روش آماده سازی)؛
  - ۶- گزارش سختی پوشش و بستره؛
  - ۷- گزارش کامل شرایط محیطی و کاری و تمام پارامترهای آزمون (جنس ساینده، قطر شیار سایش، دمای محیط، رطوبت، نیروی اعمالی، سرعت لغزش و مسافت لغزش) و وجود یا عدم وجود روانکار/سیال؛
  - ۸- روش آزمون استفاده شده؛
  - ۹- دستگاه‌ها و تجهیزات استفاده شده براساس این استاندارد؛
  - ۱۰- مشخص کردن تعداد اندازه گیری‌ها در هر آزمون (حداقل سه آزمون)؛
  - ۱۱- گزارش روش استفاده شده برای اطمینان از انجام آزمون سایش در محدوده پوشش و عدم ورود به بستره (مانند استفاده از پروفایل شیار سایش)؛
  - ۱۲- گزارش میزان کاهش جرم یا کاهش حجم و میزان سایش ویژه؛
  - ۱۳- گزارش عددی میانگین ضریب اصطکاک یا نمودار ضریب اصطکاک برحسب مسافت لغزش؛
  - ۱۴- گزارش هر ویژگی غیرمعمول مشاهده شده حین آزمون؛
  - ۱۵- تاریخ آزمون و امضا کارشناس مسئول و مهر تمام صفحات توسط آزمایشگاه.
- نمونه فرم پیشنهادی گزارش آزمون در پیوست الف ارائه شده است.



پیوست الف

( آگاهی دهنده )

فرم پیشنهادی گزارش نتایج آزمون سایش

مشخصات آزمایشگاه		
تاریخ آزمون:	شماره پیگیری آزمون:	
کارشناس آزمون:	نام و نشانی آزمایشگاه:	
پست الکترونیکی:	شماره تماس:	
مشخصات متقاضی		
نام:	شماره تماس:	
پست الکترونیکی:	نشانی:	
مشخصات نمونه		
کد نمونه:	جنس و سختی بستره:	
جنس و سختی پوشش:	ضخامت پوشش (برحسب میکرومتر):	
روش آماده‌سازی نمونه:	زبری سطح نمونه:	
ابعاد نمونه:	مشخصات دیگر نمونه (در صورت لزوم):	
مشخصات روش آزمون و تجهیزات		
روش/روش‌های آزمون:	نوع و مدل دستگاه و تجهیزات:	
استاندارد مرجع آزمون:	تعداد تکرار آزمون:	
جزئیات روش آزمون و بیان پارامترهای مربوط به هر روش براساس استاندارد مربوط:		
شرایط محیطی و کاری آزمون		
دمای محیط:	رطوبت:	بار اعمالی:
وجود سیال/روانکار:	سرعت لغزش:	مسافت لغزش:
جنس ساینده:	قطر مسیر سایش:	
نتیجه آزمون		
میزان کاهش جرم یا کاهش حجم نمونه:		
میزان سایش ویژه نمونه:		
میزان میانگین ضریب اصطکاک نمونه یا نمودار ضریب اصطکاک برحسب مسافت لغزش:		
گزارش پروفایل شیار سایش:		
توضیحات		
<p>امضای کارشناس آزمون و مهر آزمایشگاه:</p>		

### کتابنامه

- [۱] استاندارد ملی ایران شماره ۲-۶۷۸۲: سال ۱۳۹۶، یاتاقان‌های ساده- اصطلاحات، تعاریف، طبقه‌بندی و نمادها- قسمت ۲: اصطکاک و سایش
- [۲] استاندارد ملی ایران شماره ۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۵، فناوری نانو- واژه‌نامه- قسمت ۱: اصطلاحات اصلی
- [3] R. Zahid, H. H. Masjuki, M. Varman, R. A. Mufti, M. A. Kalam, and M. Gulzar, "Effect of lubricant formulations on the tribological performance of self-mated doped DLC contacts: A review," *Tribology Letters*, vol. 58, no. 2. p. 32, 2015, doi: 10.1007/s11249-015-0506-5.
- [4] J. W. Dini, *ELECTRODEPOSITION The Materials Science of Coatings and Substrates*. 2019.
- [۵] هوتچینگز، ای. ام. *تریبولوژی: اصطکاک و سایش مواد مهندسی*. ترجمه بخشی، سعیدرضا (۱۳۹۴). انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر
- [6] M. Amiriyan, C. Blais, S. Savoie, R. Schulz, M. Gariépy, and H. Alamdari, "Tribomechanical properties of HVOF deposited Fe<sub>3</sub>Al coatings reinforced with TiB<sub>2</sub> particles for wear-resistant applications," *Materials*, vol. 9, no. 2. 2016, doi: 10.3390/ma9020117.
- [7] BS EN 1071-13:2010, *Advanced technical ceramics — Methods of test for ceramic coatings- Part 13: Determination of wear rate by the pin-on-disk method*.